RIDAA
Repositorio Institucional
Digital de Acceso Abierto de la
Universidad Nacional de Quilmes

Universidad
Nacional
de Quilmes

Martínez Valdiviezo, Jeffry Homero

Diseño e implementación de dispositivos fotónicos integrados en silicio para distintas aplicaciones tecnológicas



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Argentina.
Atribución - No Comercial - Sin Obra Derivada 2.5
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ar/

Documento descargado de RIDAA-UNQ Repositorio Institucional Digital de Acceso Abierto de la Universidad Nacional de Quilmes de la Universidad Nacional de Quilmes

Cita recomendada:
Martínez Valdiviezo, J. H. (2025). Diseño e implementación de dispositivos fotónicos integrados en silicio para distintas aplicaciones tecnológicas. (Tesis de doctorado). Universidad Nacional de Quilmes, Bernal, Argentina. Disponible en RIDAA-UNQ Repositorio Institucional Digital de Acceso Abierto de la Universidad Nacional de Quilmes http://ridaa.unq.edu.ar/handle/20.500.11807/5724

Puede encontrar éste y otros documentos en: https://ridaa.unq.edu.ar

Universidad
Nacional
de Quilmes

Roque Sáenz Peña 352 // Bernal
Buenos Aires // Argentina
t.: (+41 11) 4365 7100
f.: (+54 11) 4365 7101
info@unq.edu.ar

Jeffry Homero Martínez Valdiviezo, Repositorio Institucional Digital de Acceso Abierto,
Abril de 2025, pp. 329,
http://ridaa.unq.edu.ar,
Universidad Nacional de Quilmes
Doctorado en Ciencia y Tecnología

Diseño e implementación de dispositivos fotónicos integrados en silicio para distintas aplicaciones tecnológicas

TESIS DOCTORAL

Jeffry Homero Martínez Valdiviezo

jeffry.acm10@gmail.com

Resumen

Desde la llegada de la fibra óptica en los años 60, sustituyendo a los tradicionales hilos de cobre por sus bajas pérdidas de transmisión y su alta capacidad, se ha puesto mucho esfuerzo en el desarrollo de componentes y sistemas aprovechando la naturaleza electromagnética de la luz. La fotónica de silicio ha surgido como una tecnología madura que se espera que desempeñe un papel clave en aplicaciones emergentes críticas, incluidas las comunicaciones ópticas de muy alta velocidad, sensores espectroscópicos y biológicos, la detección de distancias para vehículos autónomos, tecnología espacial y el procesamiento de información cuántica. El éxito de la fotónica de silicio ha sido posible gracias a la combinación única de alto rendimiento y capacidad de volumen, que sólo se puede lograr mediante la estandarización de la tecnología de fabricación. Un chip fotónico integrado es un dispositivo que combina múltiples componentes fotónicos en una única plataforma, utilizan la luz para transmitir y procesar información a nivel micro/submicrométrico de manera eficiente y compacta. Representan una evolución tecnológica clave, que combina las ventajas de la óptica y la electrónica para satisfacer las crecientes demandas de velocidad, capacidad y eficiencia en una amplia gama de aplicaciones tecnológicas avanzadas.

En esta tesis se desarrollaron múltiples dispositivos fotónicos integrados en chips (PICs) con la tecnología del silicio. Para lograrlo, fue necesario comprender los fenómenos físicos que los gobiernan, utilizando métodos numéricos para el diseño, modelado, optimización y enrutamiento de los circuitos ópticos, finalmente se profundizaron y caracterizaron los procesos de micro-fabricación.

Primero se profundizó el estado del arte y los componente fundamentales de la fotónica del silicio, esto mediante sucesivas simulaciones numéricas hasta con-seguir una versión realista de los dispositivos de interés en este trabajo. En una primera etapa se desarrollaron divisores de potencia ópticos 1x2 integrados, y luego fueron escalados a divisores 1x4 y 1x8, además se diseñaron distintos tipos de estructuras fotónicas para caracterizar pérdidas por

curvaturas y propagación en guías de onda. Luego, mediante herramientas de dibujo asistido y programas automatizados para la generación de layout de componentes, los patrones de los dispositivos fueron transferidos a una fotomáscara que fue fabricada mediante procesos litográficos. Esto fue el preámbulo para profundizar sobre las técnicas litográficas convencionales de los procesos de fabricación con tecnología CMOS, en donde el material de soporte para el desarrollo de estos dispositivos fue el nitruro de silicio (SiNx). Las técnicas más relevantes caracterizadas en este trabajo fueron: depósito de fotoresinas, exposición UV, procesos de revelado y ataques físicos/químicos (etching).

Además, en esta tesis también se trabajó con otro de los soportes claves de la fotónica del silicio, el Silicio Sobre Aislante (Silicon- On-Insulator, SOI). Se de-muestra la implementación de divisores de potencia integrados 1x2, 1x4 y 1x8. La geometría del divisor fue reducida considerablemente ingresando un interferómetro multimodal en la entrada (MMI) y las ramas de las salidas fueron diseñadas a partir del acoplamiento coherente simplificado (SCC). Luego, una vez más median-te distintos enfoques de simulaciones numéricas, los parámetros sensibles fueron optimizados. Los divisores de potencia fueron fabricados por la foundrie COR-NESTONE. Posteriormente el chip fotónico que contiene los divisores propuestos, fueron caracterizados y comparados con otros divisores de potencia convencio-nales, que también fueron integrados en el mismo chip. Para caracterizar chips fotónicos, es necesario contar con un sistema fiable que nos permita adquirir y pro-cesar la potencia óptica y respuesta espectral de los dispositivos integrados, motivo por el cual en este trabajo se desarrolló un sistema de micro-posicionamiento automático, para la adquisición y el análisis de las potencias ópticas transmitidas de los dispositivos fotónicos. Por otro lado, se presenta y describe cuidadosamente el proceso de empaquetado de un divisor de potencia MMI+SCC 1x8, que implica la pre-alineación y el acoplamiento de la señal óptica al chip, como así también la integración de todos los componentes. Además, diseñamos el hausing del sistema teniendo en cuenta los componentes internos y externos del dispositivo final, don-de se han incluido las interfaces de I/O compatibles con fibra óptica SM. Para el último paso, todos los componentes y la carcasa se fabricaron mediante impresión 3D.

La siguiente etapa de esta tesis aborda el diseño de dispositivos demultiplexores de longitud de onda (Arrayed Waveguide Gratings, AWG), nos enfocamos en las plataformas del silicio sobre aislante (SOI) y nitruro de silicio (SiNx). Primero se detalla el principio de funcionamiento de este sistema y la respuesta espectral del mismo, luego mediante distintos métodos numéricos se hace un análisis de los parámetros sensibles y la influencia que tienen en el rendimiento del AWG. Se escalaron AWGs 1x8 y 1x16 en ambas plataformas tecnológicas. Luego, se enviaron a fabricar diseños preliminares a CORNESTONE y se caracterizaron con el sistema de micro-posicionamiento previamente desarrollado. Finalmente, se desarrolla el diseño de un sensor espectroscópico de alta resolución para la detección de gases en la banda NIR, que resulta de la combinación de sistemas de anillos

Repositorio Institucional Digital de Acceso Abierto, Universidad Nacional de Quilmes

resonadores-CROW y AWGs. Se estudian sus comportamientos espectrales y se escalan ambos sistemas para que el Free Spectral Range del sistema de anillos-CROW, coincida con el espaciado de canales del AWG. A partir de este análisis se propone una topología optimizada para la detección de gases basado en la teoría de la espectroscopia del NIRs. Las etapas de los sub-sistemas del sensor espectroscópico, son verificadas mediante simulaciones numéricas, y se muestran los resultados espectrales y la resolución alcanzada.

Repositorio Institucional Digital de Acceso Abierto, Universidad Nacional de Quilmes



Departamento de Ciencia y Tecnología

Ph.D. Thesis.

Diseño e implementación de dispositivos fotónicos integrados en silicio para distintas aplicaciones tecnológicas.

Tesis de Posgrado para obtener el título en:

Doctor en Ciencia y Tecnología.

Autor: **Ing. Martínez Valdiviezo, Jeffry Homero**

Director: Dr. Torchia, Gustavo.

Lugar de trabajo:
Laboratorio de Fotónica Integrada
Centro de Investigaciones ópticas
(CONICET-CIC-UNLP))

Febrero 2025

Dedicado a mis padres,
a mi familia y pareja,
a mis amigos y compañeros de trabajo,
con quienes pude compartir todo este tiempo
y con quienes me he formado como persona.
Este trabajo no hubiese sido posible sin sus estímulos,
apoyo incondicional y empuje constaste.

Todo lo que puedas imaginar, ¡es real!
Pablo Picasso

Agradecimientos.

¡Existen muchas personas a las que debo agradecer por tanto!

En primer lugar quiero agradecer a mi director de tesis Dr. Gustavo Torchia, quien con sus ideas me inició en el mundo de la fotónica integrada cuando aún no tenia claro para donde enfocar mi carrera. El ha sido mi director de tesis de ingeniería y ahora de esta tesis doctoral. Le agradezco no solo por su inmenso profesionalismo en el ámbito académico y científico, sino también en lo personal, ya que después de tantos años de vivencias y congresos, de altibajos marcados por la pandemia y la situación actual de la ciencia en Argentina, ha sido inmejorable su labor conmigo en mi formación como persona, su respaldo y acompañamiento.

También, quiero agradecer al Centro de Investigaciones Ópticas La Plata (CIOp, CONICET-CIC-UNLP) y al Departamento de Micro y Nanotecnología (DMNT, CAC-CNEA), por abrirme sus puertas durante todos estos años, quienes me brindaron las herramientas necesarias para llevar adelante este trabajo de investigación, y sobre todo por todo el recurso humano que siempre estuvo a disposición, con quienes me he formado como profesional y con mas de uno he podido formar lazos de amistad. A la universidad pública, gratuita y de calidad, por los cursos de posgrado ofrecidos en el trayecto del programa de este Doctorado, como lo fue la Facultad de Ingeniería (Universidad de Buenos Aires), el Instituto Sabato (Universidad de San Martín - CNEA) y a mi querida Universidad Nacional de Quilmes (UNQ), casa de altos estudios, quien además me aceptó como candidato a Doctor en Ciencia y Tecnología, y ahora tengo la oportunidad de hacer pública la defensa de este manuscrito.

A la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), por financiar mi formación doctoral mediante el otorgamiento de becas doctorales de iniciación, finalización y de estadía corta.

En cuanto a mis compañeros, quiero agradecer a Roberto Peyton con quien inicié mis primeros años doctorales en la fotónica del silicio y de quien aprendí muchísimo. También a Damián Presti, Valentin Guarepi, Fabián Videla, Enrique Neyra, Paula Pagano, Juan Manuel Rodriguez y Adrian Di Marco, con quienes compartí incontables horas de laboratorio aprendiendo óptica y fotónica, así como almuerzos, viajes y grandes momentos fuera del ámbito académico. Todos ellos han sido, y algunos aún son, parte del grupo de Fotónica Integrada del CIOp.

También quiero agradecer a Mauricio Tosi, Andrés Di Donato, Claudio Ferrari, Dante Mercado, Leonardo Morbidel, Juan Mary, Enrico Petriella, Alejandro Fasciszewski y Juan Bonaparte, con quienes compartí innumerables horas en el mundo de las salas limpias y en el aprendizaje de técnicas litográficas de microfabricación. Además, fueron compañeros en largas conversaciones sobre fútbol, prodes mundialistas y otros momentos que trascendieron lo meramente laboral. Todos ellos forman parte del DMNT de la Comisión Nacional de Energía Atómica.

También quiero agradecer a Nicolas Abadía y la foundrie Cornestone (Gales -Reino Unido), quienes nos facilitaron la fabricación de chips fotónicos sin ningún coste, mediante proyectos multi-oblea (MPW).

A los proyectos de investigación: "Desarrollo y fabricación de un dispositivo biofotónico (Point Of Care) con aplicaciones al diagnóstico molecular" Proyecto FITBA A177 (2024 - 2025); "Diseño y desarrollo de un sistema de control automático de micro-posicionamiento asistido por visión artificial" PPROF RR-664/21 (2020 - 2022); "Diseño, fabricación e implementación de dispositivos integrados de división de potencia para comunicaciones ópticas" PICT-2017-0017 (2018 - 2022); y "Diseño y desarrollo de montaje en impresoras 3D para la implementación de prácticas de laboratorio de óptica" PPROF RR-462/185 (2018 – 2019). Proyectos dirigidos por Gustavo A. Torchia, que contribuyeron significativamente a mi formación profesional y financiaron, total o parcialmente, material e instrumental utilizado en esta tesis doctoral.

Finalmente, quiero agradecer a mi madre, Alba; a mis hermanas, María, Andrea, Yadira, Johanna y Alessandro; a mis cuñados Mario, Iván, Diego y Vinicio, a mis sobrinos y amigos, por estar presentes y mantenerme firme en mis objetivos, no solo en estos últimos años, sino a lo largo de toda mi vida. A mi pareja, Mariana, quien me ayudó a ver el lado positivo de las cosas en momentos difíciles.

Y a quien me mira desde arriba, solo puedo decirle que no ha sido fácil, ¡pero lo conseguí, viejito!

A todos ustedes, ¡Mil veces gracias por acompañarme a cumplir este objetivo!

Todos los estudios y desarrollos realizados en el trayecto de este doctorado y en el marco de esta tesis, se encuentran publicados en los artículos que se detallan a continuación:

- **Jeffry Martínez Valdiviezo**, Roberto Peyton, Juan Manuel Rodriguez, Raúl Della Salda, Nicolás Abadía, and Gustavo A. Torchia, "Design, fabrication, testing, and packaging of the 1 × 8 power splitter developed under the SOI platform" Applied Optics 64, 1427-1434 (2025); https://doi.org/10.1364/AO.541307.
- Roberto Peyton, **Jeffry Martínez Valdiviezo**, Damian Presti, and Gustavo A. Torchia "Small multimode interferometer with simplified coherent coupling branches used to develop a lower footprint power splitter on silicon-on-insulator platform," Optical Engineering 64(1), 017104 (28 January 2025). https://doi.org/10.1117/1.OE.64.1.017104.
- **Jeffry H. Martínez Valdiviezo**, Gustavo A. Torchia, "Design and development of integrated sensors under the silicon on insulator (SOI) platform for applications in the near/mid-infrared (NIR/MIR) band," Proc. SPIE 13116, Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, Thin Films, and Devices XXI, 131160D (4 October 2024); https://doi.org/10.1117/12.3028216.
- Damián A. Presti, Lucas Marchesano, **Jeffry Martinez Valdiviezo**, Lucas Ripoll, Gustavo A. Torchia, and Marcos Bilen, "Optical sensor applications in advancing colorimetric molecular diagnostics", Proc. SPIE 13126, Molecular and Nanophotonic Machines, Devices, and Applications VII, 1312609 (30 September 2024); https://doi.org/10.1117/12.3036147.
- R. Peyton, **J. H. Martinez**, F. Videla, G. A. Torchia, "A small footprint Y-branch power splitter based on simplified coherent coupling on Silicon Nitride," Proc. SPIE 11802, Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, Thin Films, and Devices XVIII, 118020O (1 August 2021); https://doi.org/10.1117/12.2593727.
- R. Peyton, **J. H. Martinez**, F. Videla, G. A. Torchia, "A silicon integrated photonic sensor using Bragg gratings and signal post-processing," Proc. SPIE 11802, Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, Thin Films, and Devices XVIII, 118020N (1 August 2021); https://doi.org/10.1117/12.2593723.

- Gustavo E. Ratto, Fabián A. Videla, **Jeffry H. Martínez Valdiviezo**, "Artificial light: traditional and new sources, their potential impact on health and coping strategies: preliminary spectral analysis," Proc. SPIE 11814, Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XXII, 118140O (1 August 2021); https://doi.org/10.1117/12.2593623.

- Damián A. Presti, Julián Bergier, **Jeffry Martinez Valdiviezo**, Marcos Bilen, Gustavo A. Torchia, "Development and construction of a point of care device for application to molecular diagnostics," Proc. SPIE 11812, Molecular and Nano Machines IV, 118120L (1 August 2021); https://doi.org/10.1117/12.2598458

- **J. M. Valdiviezo.**, R. Peyton, D. Presti, F. Videla and G. A. Torchia, "Diseño y desarrollo de un sistema de control para estabilizar la energía de un sistema de micro-mecanizado láser," 2020 IEEE Congreso Bienal de Argentina (ARGENCON), Resistencia, Argentina, 2020, pp. 1-8, doi: https://doi.org/10.1109/ARGENCON49523.2020.9505536.

- R. Peyton, **J. H. M. Valdiviezo**, F. Videla, and G. A. Torchia, "Sensibility approximation for Bragg gratings structures: An interesting tool for sensing design," in Frontiers in Optics / Laser Science, B. Lee, C. Mazzali, K. Corwin, and R. Jason Jones, eds., OSA Technical Digest (Optica Publishing Group, 2020), paper JTh4B.22. https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=FiO-2020-JTh4B.22.

- M. Tosi, **J. H. Martinez**, A. Fasciszewski, L. A. Bulus Rossini and P. A. Costanzo Caso, "Fabricación de PICs basados en SiN utilizando litografía por escritura directa con láser UV," 2020 IEEE Congreso Bienal de Argentina (ARGENCON), Resistencia, Argentina, 2020, pp. 1-5, https://doi.org/10.1109/ARGENCON49523.2020.9505469.

- R. Peyton, D. Presti, **J. H. Martínez Valdiviezo**, F. Videla and G. A. Torchia, "Desarrollo de experiencias para la enseñanza y difusión de la Óptica con impresión 3D,"2020 IEEE Congreso Bienal de Argentina (ARGENCON), Resistencia, Argentina, 2020, pp. 1-6, https://doi.org/10.1109/ARGENCON49523.2020.9505322.

- Mauricio Tosi, **Jeffry H. Martínez**, Roberto Peyton, Alejandro Fasciszewki, Gustavo Torchia, Nicolás Abadía, Jorge Parra, Pablo Sanchis, Laureano A. Bulus-Rossini and Pablo A. Costanzo-Caso, "Fabrication of Silicon Nitride

PIC by Laser Direct Writing," in European Conference of Integrated Optics, 22rd edition, 23-24 June 2020, Paris, France; https://www.ecio-conference.org/wp-content/uploads/2020/06/4p-Mauricio-Tosi-Fabrication-of-Silicon-Nitride-PIC-by-Laser-Direct-Writing-ECIO-2020.pdf.

Presentación de trabajos en congresos nacionales e internacionales más relevantes:

- SPIE Optics + Photonics 2024. Presentación de trabajo: "Design and development of integrated sensors under the silicon on insulator (SOI) platform for applications in the near/mid-infrared (NIR/MIR) band", San Diego, California, EE.UU., 18-22 de agosto de 2024. Grant de viaje otorgado por SPIE.
- Reunión de la Asociación Física Argentina-RAFA 2022. Presentación de trabajo: "Diseño, modelado y simulaciones numéricas de Demultiplexores de Longitud de Onda (AWGs), basados en la tecnología del silicio", Bariloche, Argentina, 27-30 de septiembre de 2022.
- Reunión de la Asociación Física Argentina-RAFA 2020. Presentación de trabajo: "Diseño e implementación de un Divisor de Potencia Integrado en Fotónica de Silicio", Formato virtual, 16-30 de septiembre de 2020.
- IEEE ARGENCON 2020. Presentación de trabajo: "Diseño y desarrollo de un sistema de control para estabilizar la energía de un sistema de micromecanizado láser", Formato virtual, 1-4 de diciembre de 2020.
- OPTICA IONS-ELO 2019. Presentación de trabajo: "Design of an Integrated Optical Splitter under the Si_3N_4 platform", Universidad de Campinas (UNICAMP), Sao Paulo, Brasil, 22-26 de julio de 2019. Grant de viaje otorgado por OPTICA.
- Encuentro de Estudiantes de Óptica y Fotónica - Taller de Óptica y Fotónica EEOF/TOPFOT. Presentación de avances de doctorado desde 2019 hasta 2024 en distintas localidades del país.

Índice general

0.1. Introducción 1
0.2. Objetivos 5
0.3. Organización de la tesis 7

I Conceptos Fundamentales **9**

1. Fotónica Integrada. **10**
1.1. Fundamentos y antecedentes. 11
1.1.1. Ventajas y desafíos. 12
1.2. Fotónica de Silicio. 14
1.2.1. Descripción general 14

2. Fundamentos teóricos **22**
2.1. Plataformas tecnológicas de la Fotónica de Silicio. 23
2.1.1. Nitruro de Silicio (Silicon Nitride). 23
2.1.2. Silicio Sobre Aislante (Silicon on Insulator). 25
2.2. Guías de onda ópticas integradas. 28
2.2.1. Estructura de las guías de ondas. 28
2.2.2. Propagación de ondas en guías de ondas ópticas planas. . . 29
2.2.3. Guía de onda canalizadas, modos cuasi-TE y cuasi-TM . . . 34
2.2.4. Tipo de guías de onda. 34
2.2.5. Resolución numérica de guías de onda. 36
2.3. Análisis espectroscópico del infrarrojo cercano NIRS 41
2.3.1. Teoría de la espectroscopia vibracional 42
2.3.2. Region espectral NIR 46

II Técnicas Experimentales y Métodos Numéricos. **50**

3. Métodos Numéricos y modelado. **51**

3.1. Diseño de circuitos ópticos para la fabricación de máscaras. 52
3.1.1. Flujos de diseño 52
3.2. Métodos de modelado y diseño. 56
3.2.1. Solucionador de modos de guía de onda óptica 56
3.2.2. Propagación de ondas 57
3.2.3. Método de expansión de auto-modos (EME) 59
3.2.4. Método de propagación del haz (BPM) 60
3.2.5. Modelado de circuitos ópticos. 61
3.3. Diseño de guías de onda. 62
3.3.1. Modelado numérico de guías de ondas. 63
3.3.2. Método del Índice Efectivo 2D. 64
3.4. Dispositivos Fotónicos Integrados (PICs) 65
3.4.1. Linear tapers 65
3.4.2. Acopladores Direccionales. 66
3.4.3. Divisor de potencia Y branch 70
3.4.4. Interferómetro Multimodal - MMI. 73
3.4.5. Anillo resonador óptico. 77
3.4.6. Redes de Bragg. 83
3.4.7. *Arrayed Waveguide Gratings* - AWG 88

4. Tecnologías de Microfabricación **106**
4.1. Técnicas de micro-Fabricación 108
4.1.1. No uniformidad en procesos de fabricación. 109
4.1.2. Salas limpias. 110
4.2. Fabricación de wafers de Nitruro de Silicio. 111
4.2.1. Procesos de fabricación con Nitruro de Silicio. 111
4.2.2. Oxidación Térmica. 112
4.2.3. Deposición. 114
4.3. Litografía UV y técnicas asociadas. 118
4.3.1. Breve historia litográfica y formación de imágenes. 118
4.3.2. Procesos litográficos. 120
4.3.3. Fotomáscaras. 121
4.3.4. Fotoresinas. 123
4.3.5. Deposición de Fotoresinas (PR). 125
4.3.6. Exposición UV. 127
4.3.7. Revelado. 130
4.3.8. *Dry Etching*. 131

5. Técnicas de acoplamiento óptico. 138
5.1. Interfaces eléctricas. . . . 139
5.1.1. Bond pads. . . . 139
5.2. El desafío tecnológico de acoplamiento óptico en chips fotónicos. . . . 139
5.3. *Grating couplers.* . . . 140
5.3.1. Teoría. . . . 143
5.3.2. Diseño y simulaciones . . . 145
5.4. *Edge Couplers.* . . . 147
5.4.1. Fibras individuales. . . . 147
5.4.2. Convertidores del tamaño del spot. . . . 147
5.4.3. Acoplador de borde tipo *Nano-taper* . . . 148

III Resultados. 155

6. Fabricación de dispositivos ópticos integrados en Nitruro de Silicio 156
6.1. Consideraciones de micro-fabricación . . . 158
6.2. Fabricación de fotomáscara de vidrio y cromo . . . 159
6.2.1. Diseño de la fotomáscara - Layout . . . 159
6.3. Caracterización de procesos litográficos . . . 162
6.3.1. Depositos de fotoresina AZ1518 Y AZ701 MIR . . . 162
6.3.2. Exposición con lámpara UV . . . 164
6.3.3. Caracterización del revelado . . . 167
6.3.4. Caracterización de los ataques físicos/químicos (*etching*). . . . 169
6.3.5. Medida de espesores con elipsometría . . . 171
6.3.6. Remoción de fotoresinas. . . . 173
6.3.7. Corte de obleas. . . . 174
6.3.8. Chips fabricados. . . . 176
6.3.9. Resumen procesos de micro-fabricación. . . . 177
6.3.10. Efecto borde. . . . 178
6.3.11. Pulido de bordes. . . . 180
6.3.12. Sistema experimental de acople óptico por borde en chips fotónicos. . . . 181
6.3.13. Montaje del sistema mediante acople *edge couplers.* . . . 181

7. Divisores de potencia ópticos integrados en silicio. 186
7.1. Acoplamiento coherente en dispositivos fotónicos integrados. . . . 187

7.2. Diseño de Divisores de potencia 1x2, 1x4 y 1x8 basados en SCC (*Coherence Coupling Theory*) y MMI (*Multi Mode Interfereance)* desarrollados en SOI y Si_3N_4. 189
7.3. Diseño de divisores de potencia integrados en Si_3N_4 189
7.3.1. Optimización del diseño. 190
7.3.2. *Layout* y fabricación 194
7.4. Diseño, fabricación, pruebas y empaquetado del divisor de potencia desarrollado bajo la plataforma SOI. 198
7.4.1. La industria fotónica exige procesos fáciles y fiables. 198
7.4.2. Diseño de divisores de potencia integrados en SOI 200
7.4.3. Layout del chip fotónico. 203
7.4.4. Fabricación de divisores de potencia integrados en SOI. . . . 204
7.4.5. Sistema de acople óptico 206
7.4.6. Proceso de pre-alineación. 209
7.4.7. Caracterización de Divisores de potencia 1x2, 1x4 y 1x8 SCC + MMI bajo la plataforma SOI. 212
7.4.8. Integración del acoplamiento chip-fibra y pruebas en tiempo real. 217
7.4.9. Empaquetado (diseño, integración e instalación de interfaces de E/S) 219

8. Demultiplexores de Longitud de onda (AWG) integrados en silicio. 226
8.1. Diseño Arreglos de redes de guías de onda (AWG) basados en SOI y Si_3N_4. 227
8.1.1. Especificaciones de un AWG. 228
8.1.2. Parámetros clave en un AWG. 228
8.1.3. Diseño, simulaciones y optimización del AWG. 231
8.1.4. Análisis de los parámetros. 239
8.1.5. Respuesta Espectral y Crosstalk. 239
8.1.6. Desplazamiento de λ_C y *Free Spectral Range* (FSR). 251
8.1.7. Resultados experimentales. 252
8.1.8. Diseño de AWGs en Nitruro de Silicio. 261
8.2. Diseño de sistemas basados en anillos resonadores y AWGs integrados en SOI, para la detección de gases en rango espectral NIR. . 266
8.2.1. Diseño de Anillos resonadores CROW basados en SOI. . . . 267
8.2.2. Moduladores de micro-anillo 269
8.2.3. Diseño de un CROW con desfasador térmico. 271

8.2.4. Introducción a los espectrómetros fotónicos integrados . . . 277
8.2.5. Diseño de espectrómetros con bajo *crosstalk* basados en AWGs y filtros de anillos resonadores. 281

IV Conclusiones. **295**

9. Conclusiones generales. **296**
9.1. Conclusiones capítulo 6. 297
9.2. Conclusiones capítulo 7. 299
9.3. Conclusiones capítulo 8. 300
9.4. Perspectivas a futuro. 302

Índice de figuras

1.1. Guía de óptica integrada 11
1.2. Infraestructura disponible a nivel mundial con tecnología CMOS . . 14
1.3. Escalado de guías de ondas por el contraste del índice. 15
1.4. Imágenes de AWGs fabricados con diferentes nodos tecnológicos . . 15
1.5. Metodología utilizada para desarrollar circuitos fotónicos integrados 18

2.1. Aplicaciones vs. rango de longitud de onda 23
2.2. Estructura y dimensiones de la plataforma: 300 nm, Si_3N_4 23
2.3. Estructura y dimensiones de la plataforma: 220 nm, SOI 27
2.4. Perfil de índice de refracción en una guía de onda óptica 28
2.5. Propagación de ondas en una guía de onda óptica plana 30
2.6. Modos TE y TM en guías de ondas ópticas planas 31
2.7. Formación de modos en una guía de onda plana 32
2.8. Visualización esquemática de los modos en una guía de onda 33
2.9. Guías de onda comúnmente usadas en fotónica de silicio 35
2.10. Solución a la ec. Helmholtz para una guía de onda Strip 39
2.11. Solución a la ec. Helmholtz para una guía de onda RIB 40
2.12. Principales bandas de absorción en el infrarrojo cercano (NIR) . . . 47
2.13. Espectros de transmitancia en la banda NIR de disolventes típicos . 48

3.1. Representación gráfica de un Kit de diseño de procesos (PDK) . . . 54
3.2. Modelo de una guía de onda en parámetros-S 62
3.3. Perfil del modo fundamental (TE) y (TM) de una guía de onda plana 63
3.4. Intensidad y optimización de la transmisión óptica en un lineal taper 65
3.5. Esquema de un acoplador direccional y perfil del modo 66
3.6. Dos modos fundamentales de un acoplador direccional 68
3.7. Longitud de cruce L_x vs. gap en un acoplador direccional 69
3.8. Gráfica de κ vs. longitud de un acoplador ideal 70
3.9. Esquema del divisor de potencia en rama Y branch. 71
3.10. Simulación 3D FDTD del Y branch optimizado 72

3.11. Esquema y parámetros relevantes de un Interferómetro Multimodal 73
3.12. Mapa de potencia, transmisión y optimización de un MMI 1x2 . . . 76
3.13. Esquema de un anillo resonador *Add-Drop* y sus parámetros. 77
3.14. Campo E y respuesta espectral de un anillo resonador 82
3.15. Esquema y respuesta espectral de una red de bragg uniforme 84
3.16. Modelado de la red de Bragg y matriz de transferencia 87
3.17. Esquema de un AWG estándar 89
3.18. Respuesta espectral de un AWG de 1x8 canales 90
3.19. Geometría de la región de propagación libre (FPR_2) 92
3.20. Dispersión y transitorios de forma de onda 92
3.21. Pérdida de inserción central, no uniformidad y FSR de un AWG . . 93
3.22. *Crosstalk* entre dos canales adyacentes y *v-parameter* 100

4.1. Espectros medidos en redes de Bragg con rugosidad 109
4.2. Sala limpia del Departamento de Micro y Nanotecnología - CNEA . 111
4.3. Obleas de Nitruro de Silicio fabricadas en CNEA. 113
4.4. Diagrama esquemático de un escáner UV moderno 119
4.5. Fotolitografía básica y transferencia de patrones 120
4.6. Fotomáscara en una configuración de exposición 121
4.7. Camplo claro vs. campo obscuro. 122
4.8. Fotoresinas: solubilidad alcalina 124
4.9. Depósito de fotoresina medienta la técnica spin coating 125
4.10. Exposición de una oblea + fotoresina con una fuente de luz UV . . 127
4.11. Espectro de absorción de las películas fotorresistentes no expuestas 128
4.12. Espectro de absorción antes y después de la exposición 129
4.13. Tasa de revelado de una fotoresina 129
4.14. Comparación del grabado anisotrópico seco e isotrópico húmedo . . 132
4.15. Diagrama de una configuración RIE 133
4.16. Esquema de un equipo RIE 134

5.1. Acoplamiento vertical y acoplamiento por borde 138
5.2. Grating coupler y fibra óptica. 140
5.3. Sección transversal de un *grating coupler* 141
5.4. Diagrama que ilustra el concepto de un *grating coupler* de salida . 143
5.5. Diagrama 2 que ilustra el concepto de un *grating coupler* de salida 144
5.6. Simulación de un *grating coupler* variando el ángulo de la fibra . . 146
5.7. Foto de un sistema de acople vertical desarrollado en esta tesis . . . 146
5.8. Perfil de modo de un *nano-taper* 149

5.9. Haces gaussianos con diferentes aperturas numéricas (NA) 149
5.10. Eficiencia de acoplamiento vs. apertura numérica (NA) 150
5.11. Simulación FDTD del acoplador de borde tipo *nano-taper* 151
5.12. Simulación FDTD del acoplador de borde a la salida (en el aire) . . 152
5.13. Simulación FDTD del acoplador: proyección de campo lejano . . . 152
5.14. Simulación FDTD: eficiencia de acoplamiento vs. NA y L 153

6.1. Máquinas de la sala limpia del DMNT 157
6.2. Lote adquirido de wafers de Si_3N_4 depositados por LPCVD. 157
6.3. Consideraciones relevantes al momento de fabricar PICs 158
6.4. *Layout* del diseño de la máscara 160
6.5. Masterizador Heidelberg DWL66fs 160
6.6. Máscara fabricada de vidrio + Cr_2O_3 161
6.7. Patrones de cromo grabados en la máscara 162
6.8. Depósito de fotoresina por *spin coating*. 163
6.9. *Spin coating*: Curvas del espesor en función de la velocidad 164
6.10. Exposición UV: distribución de intensidad 166
6.11. Alineador de máscaras comercial EVG620 167
6.12. Mesada de litografía junto a un proceso de revelado. 168
6.13. Control de patrones con microscopio 168
6.14. Equipo comercial Oxford Plasmalab 80Plus 169
6.15. Imágenes FIB-SEM (1) de estructuras fabricadas Si_3N_4 170
6.16. Imágenes FIB-SEM (2) de estructuras fabricadas Si_3N_4 171
6.17. Elipsómetro Horiba AUTO/SE 171
6.18. Caracterización de los tiempos de ataque sobre el nitruro de silicio. 173
6.19. Proceso de corte de wafers de nitruro de silicio. 175
6.20. Chips y dispositivos fotónicos fabricados en Nitruro de Silicio . . . 176
6.21. Progresos de fabricación en Si_3N_4 177
6.22. Resumen de los procesos de micro-fabricación CNEA 177
6.23. Efecto borde después de depositar fotoresina por *spin coating*. . . . 178
6.24. Clivado con punta de diamante y solución al efecto borde. 179
6.25. Pulido de los bordes de un chip de Nitruro de Silicio. 180
6.26. Primer esquema del montaje para el testeo de transmisión óptica. . 182
6.27. Segundo esquema. Alineamiento láser de salida con cámara CCD . 183
6.28. Acople por borde: *lensed fiber-to-chip* 184
6.29. Captura de microscopio de la luz visible guiada en los dispositivos. 184

7.1. Esquema del acoplamiento coherente simplificado (SCC) 188

7.2. Esquemático del divisor de potencia Y-branch 190
7.3. Transmisión en la zona de acoplamiento coherente en Si_3N_4 191
7.4. Distribución de intensidad del campo eléctrico del diseño final . . . 192
7.5. Área de los divisores de potencia 1x2 en Si_3N_4 194
7.6. Layout de divisores SCC+MMI 1x2, 1x4, 1x8 en Si_3N_4 195
7.7. Layout de divisores de potencia con acoplamiento vertical 196
7.8. Dimensiones de las guías de onda de Si_3N_4 197
7.9. Divisores de potencia fabricados con tecnología Si_3N_4 197
7.10. Estructura de las guías onda en SOI 200
7.11. Elección del parámetro W_{MMI}. 201
7.12. Área de los divisores de potencia 1x2 MMI y SCC+MMI 202
7.13. Diseño correspondiente al chip fotónico utilizado en este trabajo . . 203
7.14. Divisor de potencia SCC+MMI con sus respectivos *grating couplers* 205
7.15. Diagrama esquemático de la plataforma de acople vertical 206
7.16. Configuración experimental para acoplar con *grating couplers* . . . 207
7.17. Vistas de la configuración experimental del acople vertical 208
7.18. Pre-alinenación del sistema grating coupler-on-chip 210
7.19. Distribución de potencia registrada para acople óptimo 211
7.20. Transmisión óptica del divisor SCC 1x4 en SOI 214
7.21. Transmisión óptica correspondiente al divisor MMI 1x4 en SOI . . 215
7.22. Transmisión óptica de splitters SCC+MMI 1X8 en SOI 216
7.23. Fotografía bajo iluminación UV durante el proceso de curado . . . 218
7.24. Diseño de empaquetado final del divisor de potencia 1x8 SCC . . . 220
7.25. Imagen del prototipo abierto y cerrado 221

8.1. Radio constante y variable para la construcción de un AWG 231
8.2. Estructura de la guía de onda monomodo para la plataforma SOI. . 232
8.3. Campo |E| vs θ para diferentes longitudes de onda 233
8.4. Respuesta espectral del AWG 1x8 en la plataforma SOI 234
8.5. Acoplador de entrada: (a) N_{arrays} vs λ. (b) Amplitud $|E|$ vs N_{arrays}. 235
8.6. Acoplador de entrada: Mapa de potencia y transmisión 235
8.7. *Liner tapers* en los acopladores de entrada del AWG 237
8.8. Optimización del largo del *linear taper* 237
8.9. Simulaciones FDTD en la FPR_2 239
8.10. *Croostalk* global variando el ancho w de las guías de onda 241
8.11. Respuesta espectral y *crosstalk* variando $\delta\lambda$ en un AWG 243
8.12. Respuesta espectral y *crosstalk* variando N_{arrays} en un AWG 245
8.13. Respuesta espectral y *crosstalk* variando m en un AWG 247

8.14. Respuesta espectral y *crosstalk* variando d_a en un AWG 249
8.15. Pérdidas en el canal central *Lo* al incrementar la distancia d_a . . . 250
8.16. Desplazamiento del FSR y λ_c en función del orden m del AWG. . 252
8.17. Set-Up experimental para medir la respuesta espectral de AWGs . . 253
8.18. Chip fotónico con AWGs integrados 254
8.19. Monitores para acoplar el *array* de fibras con los AWGs 254
8.20. Cad del chip fabricado. 255
8.21. Respuesta espectral del AWG 1x8 junto a la fuente SLED 256
8.22. Dimensiones y respuesta espectral de los *grating coupler* empleados 257
8.23. Respuesta del AWG 1x8 sin las pérdidas por acoplamiento 259
8.24. Guías de onda monomodo en Si_3N_4 para el desarrollo de AWGs . . 261
8.25. Indice de refracción del Si_3N_4 LPCVD por Cornestone 262
8.26. Indice efectivo vs ancho de la guía w en Si_3N_4 262
8.27. *Layout* y respuesta espectral de un AWG 1x8 en Si_3N_4 263
8.28. *Layout* y respuesta espectral de un AWG 1x16 en Si_3N_4 264
8.29. Onda viajera en una cadena finita de anillos resonadores. 268
8.30. Guía de onda implementada en el diseño del CROW. 271
8.31. Esquema del CROW conformado por dos anillos y calentadores . . 272
8.32. Optimización de los coeficientes de acoplamiento 274
8.33. Espectros del puerto *drop* variando el voltaje aplicado. 275
8.34. Espectros del puerto *through* variando el voltaje aplicado. 275
8.35. Simulación 3D-FDTD en las regiones de acoplamiento 276
8.36. $|S|$ vs gap en el CROW 277
8.37. Principio de funcionamiento del espectrómetro integrado 279
8.38. Esquema del espectrómetro integrado 280
8.39. Espectros de transmisión de un AWG, MRR y un CROW 283
8.40. Espectro de absorción de gases de efecto invernadero 287
8.41. Pérdidas de inserción y *crosstalk* del canal vecino en el canal central. 287
8.42. Espectrómetro de 80 canales frente a los espectros de absorción . . 288
8.43. Respuesta espectral del espectrómetro integrado de 144 canales. . . 289
8.44. Pérdidas de inserción y *crosstalk* del canal vecino en el canal central. 289
8.45. Espectrómetro de 144 canales frente a los espectros de absorción . . 290

0.1. Introducción

Estamos en la cúspide de cambios revolucionarios en la tecnología de las comunicaciones y los micro-sistemas, mediante la unión de la fotónica y la electrónica en una única plataforma. Al combinar la integración fotónica con la integración electrónica ambas a gran escala, en los próximos años surgirán sistemas de chips completamente nuevos.

Los circuitos opto-electrónicos desempeñarán un papel omnipresente a nivel mundial, impactando áreas como las comunicaciones de alta velocidad para dispositivos móviles (teléfonos inteligentes, tabletas), las comunicaciones ópticas dentro de computadoras y centros de datos, sistemas de sensores y aplicaciones médicas. En particular, podemos esperar que los primeros impactos surjan en las telecomunicaciones, los centros de datos y la computación de alto rendimiento, y que la tecnología eventualmente migre hacia aplicaciones de consumo de mayor volumen y menor alcance.

En el campo emergente de la electrónica en la década de 1970, Lynn Conway de Xerox PARC y el profesor Carver Mead de Caltech desarrollaron una metodología de diseño electrónico, escribieron un libro de texto, enseñaron a los estudiantes cómo diseñar circuitos electrónicos integrados, y sus diseños fueron fabricados por Intel y HP como obleas multiproyecto (MPW), donde se compartían diferentes diseños en una sola ejecución de fabricación [1]. Estos esfuerzos llevaron a la fundación de una organización llamada MOSIS en 1981 que introdujo el costo compartido de los procesos de fabricación con acceso público. El ciclo económico de diseño, construcción y prueba habilitado por MOSIS capacitó, y continúa capacitando, a miles de diseñadores que son responsables de la ubicuidad de la electrónica que vemos hoy. MOSIS comenzó basándose en procesos comerciales que ya estaban en producción y los abrió a la comunidad de diseño para fines de investigación y creación de prototipos.

Una de las claves del éxito a largo plazo en la comunidad de la microelectrónica, y especialmente en la comunidad CMOS, ha sido el acceso a estos procesos. Al hacer que estos procesos de producción en volumen estén disponibles públicamente para la investigación y el desarrollo a un costo razonable, cualquier persona con un financiamiento modesto puede llevar a cabo trabajos innovadores y avanzados en un proceso que puede ser escalado rápidamente a una producción en masa. Capacitar a los estudiantes de ingeniería en el uso de estas herramientas y procesos de producción, y permitirles crear circuitos avanzados que, con un financiamiento limitado, pueden convertirse en nuevas empresas de circuitos integrados sin fábrica, ha sido la fuente de muchas empresas exitosas. Es difícil exagerar la

diferencia entre esta situación y la de la fotónica (y la mayoría de los campos de la ingeniería), donde llevar la investigación a la producción enfrenta enormes barreras.

La disponibilidad pública de los procesos de producción a un costo razonable y con financiamiento limitado ha tenido un impacto significativo en el avance de la tecnología, permitiendo innovaciones y desarrollos que de otro modo habrían sido inaccesibles para muchas instituciones y emprendedores. Este enfoque ha sido particularmente influyente en el campo de la fotónica de silicio, donde la investigación y el desarrollo pueden ser prohibitivamente costosos debido a la necesidad de equipos y procesos especializados.

En Latinoamérica y Argentina, la accesibilidad a estos procesos ha catalizado el desarrollo de la fotónica de silicio. La posibilidad de utilizar procesos de fabricación comerciales para la investigación y el prototipado ha permitido a universidades e instituciones de investigación realizar avances significativos sin requerir inversiones exorbitantes en infraestructura. Por ejemplo, el Centro de Investigaciones Ópticas (CIOp), la Universidad Nacional de Quilmes (UNQ), la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y el Instituto Balseiro (IB) en Argentina han podido realizar investigaciones avanzadas en fotónica de silicio gracias al acceso a procesos de fabricación compartidos y de bajo costo. Estos esfuerzos están facilitando el crecimiento de una comunidad local de expertos en fotónica, que es fundamental para el desarrollo de tecnologías de comunicación avanzadas y sistemas de sensores ópticos.

Uno de los ejemplos más claros de este impacto es el desarrollo de la Red de Óptica Fotónica en Argentina, que busca promover la colaboración entre instituciones de investigación, empresas y el gobierno para avanzar en la fotónica y sus aplicaciones, logrando la interacción y participación activa entre la comunidad más joven e investigadores de larga trayectoria, fortaleciendo aún más la colaboración entre instituciones. La disponibilidad de procesos de producción compartidos ha sido clave para que esta red pueda desarrollar proyectos colaborativos y prototipos, acelerando el avance de la tecnología en la región. Un ejemplo colaborativo entre diferentes instituciones es la del Centro de Investigaciones Ópticas y el Departamento de Micro y Nanotecnología (DMNT-CNEA), que han dado el primer salto en los procesos de producción de la fotónica del silicio, poniendo en marcha el primer sistema automático de acople óptico vertical hacia el chip y haber caracterizado los procesos litográficos de micro-fabricación en el régimen de la fotónica de silicio.

El silicio es uno de esos materiales que cambiaron drásticamente el panorama científico, tecnológico y social desde la invención del transistor por Bell Labs en 1947. Su uso ha permitido el desarrollo de dispositivos electrónicos más baratos, pequeños y rápidos, impulsados por la ley de Moore, que predice un aumento exponencial en el número de transistores por chip cada 18 meses. El silicio es preferido en la industria de semiconductores debido a su abundancia (es el segundo elemento más abundante en la tierra después del oxígeno), costo económico, eficiencia a temperatura ambiente, alta temperatura de procesamiento y facilidad para integrar materiales relacionados. También es fácil de hacer crecer dióxido de silicio y materiales relacionados en Si, permitiendo técnicas de fabricación como el procesamiento de circuitos planos y paralelos.

Las interconexiones eléctricas (IE) tradicionales están alcanzando sus límites, enfrentando dificultades para manejar la creciente demanda de datos, lo que ha llevado a considerar las interconexiones ópticas (OI). Las OI utilizan fotones en lugar de electrones, ofreciendo una solución más eficiente y sostenible. Esta evolución ha sido impulsada por la necesidad de manejar el creciente volumen de datos digitales, especialmente en centros de datos y el desarrollo del "Internet de las Cosas".

El silicio sobre aislante (SOI) ha revolucionado la fotónica, ofreciendo propiedades ópticas excelentes, como un amplio rango de transparencia de longitud de onda y un alto índice de refracción, permitiendo la creación de dispositivos compactos y de alta densidad. La fotónica de silicio ha abierto nuevas aplicaciones en comunicaciones ópticas y ha llevado al desarrollo de transceptores ópticos para centros de datos y sensores biomédicos y químicos.

Durante algunos años, se han desarrollado soluciones industriales que combinan fotónica y electrónica para abordar los requisitos de las telecomunicaciones avanzadas, procesamiento de señales ópticas, sistemas intra-chip, LIDAR, espectroscopia óptica, fotónica cuántica y dispositivos ópticos de RF. Numerosos dispositivos fotónicos en chips están en desarrollo para aprovechar al máximo las capacidades del silicio.

Por lo tanto, para aprovechar todas estas capacidades que nos brinda la tecnología del silicio, esta tesis se enfoca en el desarrollo dispositivos fotónicos integrados y las técnicas de fabricación de chips ópticos. Se investigan, diseñan y caracterizan diversos dispositivos fotónicos hechos con diferentes materiales, evaluando sus características y potencialidades. En particular, se desarrollan varios diseños de componentes y circuitos fotónicos integrados utilizando plataformas de silicio sobre aislante (SOI) y nitruro de silicio (SiN). Los dispositivos creados

incluyen divisores de potencia, interferómetros multimodo, acopladores, sensores espectroscópicos basados en demultiplexación de longitud de onda (AWG) y anillos resonadores, entre otros. Finalmente, se profundiza en las herramientas numéricas para el modelo de circuitos fotónicos, y las técnicas ópticas asociadas para interrogar los dispositivos integrados en los chips fotónicos.

Referencias

[1] Lynn Conway. «Reminiscences of the VLSI Revolution: How a Series of Failures Triggered a Paradigm Shift in Digital Design». En: *Solid-State Circuits Magazine, IEEE* 4 (2012), págs. 8-31. DOI: 10.1109/MSSC.2012.2215752.

0.2. Objetivos

El objetivo principal de esta tesis es el desarrollo de dispositivos fotónicos integrados. Específicamente, se propone diseñar, fabricar y caracterizar dispositivos fabricados mediante la tecnología del silicio. Por lo tanto, esta tesis se fundamenta en 4 objetivos principales.

- **Estudio de dispositivos fotónicos:** La primer etapa consiste en el estudio de la tecnología de la fotónica del silicio y el estado del arte de la misma. En esta fase, se profundiza en las variables más sensibles y como estas pueden influir en el rendimiento de los dispositivos fotónicos en las plataformas del *Silicon-On-Insulator* (SOI) y Nitruro de Silicio (Si_3N_4).

- **Diseño de dispositivos fotónicos:** La fase de diseño implica la proyección y desarrollo de los conceptos fundamentales que sustentan los dispositivos. Se realizarán análisis teóricos de las guías de onda, simulaciones electromagnéticas y estudios de las interacciones de la luz con las estructuras fotónicas. Se optimizarán diferentes geometrías para minimizar pérdidas y asegurar un buen rendimiento. En esta etapa se utilizarán diversos programas de cálculo numérico y se elaborarán los modelos necesarios para la fabricación con tecnología de silicio. Los circuitos ópticos que se diseñaran son: radios de curvatura, divisores de potencia, anillos resonadores, MMI, acopladores direccionales, sistemas de multiplexación (AWG) en SOI y SiN_x. Diseño de un sensor de gases basado en la banda del infrarrojo cercano mediante un sistema AWG-Anillo Resonador utilizando la plataforma SOI.

- **Fabricación de chips integrados:** Familiarización con la tecnología del silicio para la fabricación de circuitos ópticos en la plataforma del Nitruro del Silicio. En esta fase se implementan todas las técnicas y herramientas tecnológicas para producir los dispositivos diseñados. Se aplicarán y caracterizarán técnicas de micro-fabricación de la industria CMOS como el deposito de fotoresinas, diseño y fabricación de foto-máscaras, litografía UV, revelado y *etching*. También se utilizan mecanismos comerciales de producción para los dispositivos en la plataforma SOI.

- **Caracterización con técnicas de acople óptico:** Esta es la fase de prueba de los dispositivos ópticos integrados. Aquí se evalúa su rendimiento mediante configuraciones ópticas de laboratorio. Se desarrollan y presentan distintos esquemas experimentales para la caracterización de chips fotónicos:

el acoplamiento vertical mediante *grating couplers* y el acoplamiento por el borde mediante *edge coupled*. El uso de cada técnica variará según la característica del dispositivo y el nodo tecnológico utilizado (*grating couplers* para SOI y *edge couplers* para SiN_x). En la etapa de caracterización se busca medir la potencia transmitida, verificar pérdidas ópticas, modos de salida, respuesta espectral y otras variables de interés de los dispositivos integrados en el chip fotónico.

Cada uno de los objetivos planteados se profundizan en los siguientes capítulos, y los procedimientos se emplean de acuerdo con el tipo de dispositivo y tecnología de fabricación utilizada.

0.3. Organización de la tesis

Esta tesis esta estructura por 3 partes fundamentales, cada una con sus respectivos capítulos, y resume el trabajo realizado a lo largo de 5 años bajo la plataforma tecnológica del silicio, abordando el principio de funcionamiento de sus componentes elementales, la infraestructura necesaria para su desarrollo, hasta aplicaciones específicas.

- **Conceptos Fundamentales:** el *1er capítulo* hace una introducción a la fotónica integrada, sus fundamentos y antecedentes.

  En el *2do capítulo* se introduce el apasionante mundo de la fotónica del silicio junto a las plataformas tecnológicas que se abordaron en este trabajo, también los conceptos fundamentales que son utilizados a lo largo de este manuscrito.

- **Técnicas experimentales y métodos numéricos:** En el *3er capítulo* se detallan las herramientas numéricas que permitieron modelar y desarrollar los dispositivos. Además, se introducen los componente fundamentales de la fotónica del silicio y enfoques de modelado. Se introduce el AWG y se profundiza en sus parámetros clave.

  En el *4to capítulo* se exponen los fundamentos de las técnicas de micro-fabricación más empleadas en la industria de las fotónica del silicio y que se utilizaron en este trabajo. Entre las más relevantes podemos mencionar a las obleas (*wafers*)de silicio, fotomáscaras, procesos litográficos UV y *etching*.

  En el *5to capítulo* se introducen las técnicas de acoplamiento óptico hacia los chips fotónicos.

- **Resultados:** En el *6to capítulo* se muestran la caracterizaciones de los procesos de micro-fabricación llevados a cabo en la sala limpia del Departamento de Micro y Nanotecnología (CNEA) bajo la plataforma del nitruro de silicio. Además, se muestran sistemas experimentales necesarios para el acople óptico del chip fotónico por los bordes.

  En el *7mo capítulo* Se presentan los métodos numéricos para optimizar divisores de potencia propuestos 1x2, 1x4 y 1x8 en SOI y SiN_x. Utilizando la plataforma del SOI se caracterizaron estos divisores de potencia, además se desarrolla un sistema de acople vertical automático para medir la señal óptica del chip. Por último se muestran minuciosamente los procesos de ensamblaje y empaquetado de un divisor 1x8.

Finalmente, en el *8vo capítulo*, se detallan las consideraciones y parámetros a tener en cuenta para diseñar un AWG, y mediante el respaldo de simulaciones numéricas se hace un análisis del *croosstalk* (diafonía) en los canales de salida del AWG. Finalmente, se presenta el diseño de un espectrómetro integrado para la detección de gases de alta resolución en la banda NIR, en donde se propone una topología que combina sistemas de anillos resonadores-CROW y AWGs.

Parte I

Conceptos Fundamentales

Capítulo 1

Fotónica Integrada.

Índice

1.1. Fundamentos y antecedentes. 11

1.1.1. Ventajas y desafíos. 12

1.2. Fotónica de Silicio. 14

1.2.1. Descripción general 14

En diversos ámbitos de la ciencia experimental, la miniaturización de dispositivos es una tendencia que ha ido ganando velocidad, impulsada fundamentalmente por el desarrollo de la industria microelectrónica. La Fotónica no ha sido ajena a esta tendencia, pasando de las pocas decenas de micrones (fibra óptica multi y monomodo) hasta la escala micrométrica (guías de onda en Fotónica Integrada) [1] [2] [3]. La manera más eficiente (con bajo costo) de desarrollar todos estos dispositivos consiste en integrarlos en un sólo substrato plano, de tal forma que la luz viaje confinada por guías de onda acanaladas, lo que se denomina "chip óptico" o circuito óptico integrado [2] [4]. El siglo pasado fue la era de las tecnologías en base a la electrónica, este siglo muy probablemente sea la era de las tecnologías en base a la Fotónica Integrada [5]. La miniaturización de los componentes ópticos, va a jugar un rol fundamental en los sucesivos avances de la fotónica integrada [1] [5].

1.1. Fundamentos y antecedentes.

¿Que se entiende por fotónica integrada?.

La fotónica integrada hace referencia a una serie de dispositivos ópticos, integrados sobre un mismo sustrato. Bajo el apelativo de fotónica integrada se engloban los sistemas formados por dispositivos fotónicos construidos e interconectados mediante guías de onda ópticas, diseñados sobre un mismo substrato, para sustituir a los dispositivos electrónicos convencionales en la transmisión y procesado de señales [6].

En sus inicios, a finales de los años 60, la intención fue desarrollar dispositivos ópticos de modo análogo a los circuitos integrados en electrónica convencional [4]. Actualmente, los avances de la óptica integrada son la base de una nueva generación de dispositivos híbridos opto-electrónicos que reemplazarán a corto plazo la tecnología puramente electrónica, por sus amplias ventajas, pero ante todo, por el gran ancho de banda de la luz manejable [2] [3] .

Los dispositivos de óptica integrada se basan generalmente en la creación de guías de onda de un material dieléctrico con un determinado índice de refracción, el cual se encuentra rodeado de otro material de menor índice, de forma similar a lo que ocurre en la fibra óptica, formando capas transparentes [7] [8], como se muestra en la Figura 1.1.

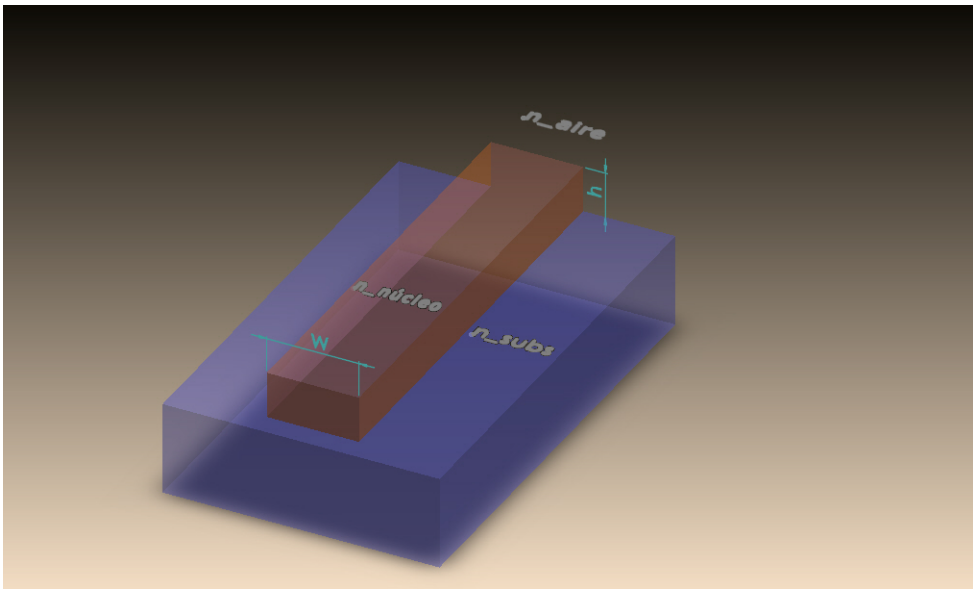


Figura 1.1: Guía de óptica integrada, formada por un material con un índice de refracción n_{nucleo} mayor a los materiales que lo rodean (n_{subs}y n_{aire}).

Entonces, la Fotónica Integrada se fundamenta en el hecho de que la luz puede ser confinada y guiada por delgadas capas o canales de material transparente [8] [9]. Es decir, mientras la electrónica se basa en corrientes eléctricas, la fotónica se basa en flujo de fotones [10]. Combinando estás capas con estructuras apropiadas, la tecnología de óptica integrada ha logrado realizar una gran variedad de dispositivos, cuyas funciones abarcan operaciones pasivas (divisores de haz, interferómetros MZ, etc), activas (láseres, amplificadores, dobladores de frecuencia, etc) y funcionales (moduladores electro-ópticos, tanto de fase y amplitud) [11] [12]. Estos componentes son compactos y pequeños, posibilitando así incorporar en un solo substrato múltiples funciones, que normalmente requerirían de todo un laboratorio para realizar tales montajes [13] [14].

La sección transversal de estas guías va desde las decenas de μm^2 hasta valores por debajo de las 0.1 μm^2 dependiendo del contraste entre los índices del núcleo de la guía y del material que lo rodea (a mayor contraste de índices, mas confinada estará la luz en la guía y se tendrán menores dimensiones transversales) [15] [16] [17]. De esta forma, se podrán crear estructuras ópticas de un tamaño muy reducido sobre un substrato plano, lo que facilitara su integración [18].

1.1.1. Ventajas y desafíos.

Es un hecho que la sociedad junto a las tecnologías se encuentran relacionadas intrínsecamente, el rápido y continuo crecimiento de la población hace eje en la necesidad de incrementar la capacidad y velocidad de transmisión de información, y es a partir de este requerimiento que la óptica y más aún de la Fotónica toman un rol importante [14] [19].

A diferencia de la transmisión de datos por cable coaxial, las señales ópticas viajan en medios dieléctricos y operan en rangos de longitudes de onda en donde los materiales no conductores son transparentes y se corresponden con un rango de frecuencias de 150 a 800 $[Thz]$ y representa 10^6 veces la frecuencia comúnmente empleada en las transmisiones eléctricas [20] [21].

En este contexto, la ventaja que tienen los dispositivos fotónicos integrados, es la miniaturización, precisamente por el hecho de manejar rangos con longitudes de onda muy cortas que operan entre 0.5 y 2 μm permitiendo enviar muchas comunicaciones a la vez usando lásers de distintas longitudes de onda [8] [12].

Es sabido que el tráfico IP global experimentará un crecimiento año tras año, pero un gran crecimiento en tráfico IP involucra un aumento proporcional de electricidad, refrigeración y espacio [22]. Este acelerado ritmo provocará un consumo

del orden de los Giga-vatios de electricidad y en consecuencia para los distribuidores de internet y las compañías de telecomunicaciones, una mayor inversión en los gastos de operación y un impacto negativo para el medio ambiente [23]. Ante esta situación, las carencias de los actuales sistemas ópticos de transporte hacen de la fotónica integrada la única respuesta hoy posible [3] [24].

A medida que los sistemas ópticos tradicionales transmiten más ancho de banda, necesitan más componentes ópticos y eléctricos, y consumen más electricidad. La ventaja de la integración fotónica es que al integrar centenares de componentes ópticos en un único chip se reduce el consumo energético por Giga-byte y tiene, en consecuencia, menores necesidades de electricidad, refrigeración y espacio [18]. Se consigue así un sistema mucho más eficaz, capaz de reducir realmente el consumo de energía por Giga-byte [25].

La fotónica integrada se desarrolla mediante diversas técnicas de fabricación y una variedad de materiales, adaptados según el nodo tecnológico y la aplicación específica. Entre las técnicas destacadas se encuentra el micro-maquinado láser de femtosegundos [26], la tecnología del silicio [27], la escritura con láser de onda continua [28] y la difusión de Zn y de Titanio en Niobato de Litio [6]. Estas técnicas permiten la creación de dispositivos integrados con alta precisión y eficiencia.

Los materiales empleados en fotónica integrada poseen propiedades específicas que determinan su desempeño según su función en el sistema integrado. Para fuentes de luz, los semiconductores III-V como el InP y GaAs son preferidos debido a sus propiedades ópticas avanzadas [29]. Para el guiado de luz en guías de onda, se utilizan materiales como el vidrio, polímeros, semiconductores III-V y silicio, cada uno con características adecuadas para diferentes longitudes de onda y aplicaciones específicas [30] [31]. En términos de modulación, los polímeros y semiconductores III-V son comunes, destacando especialmente el Niobato de Litio por sus propiedades electro-ópticas [32]. Para la detección, nuevamente se recurre a semiconductores III-V como el InP y GaAs, conocidos por su sensibilidad y respuesta rápida [29].

Basándonos en lo mencionado anteriormente, nos centramos en la tecnología del silicio y destacamos ciertas limitaciones que podrían no hacerlo un material ideal para aplicaciones fotónicas. Por ejemplo, para la integración de fuentes de luz, no posee un *band gap* directo (sin emisión espontánea) [27]; las guías de onda presentan pérdidas más altas en comparación con otros materiales [28]; carece de un mecanismo eficiente de modulación; y en cuanto a los fotodetectores, muestran una baja absorción en la banda de las telecomunicaciones [29].

Entonces **¿Por qué Fotónica de Silicio?**

1.2. Fotónica de Silicio.



Figura 1.2: Infraestructura disponible a nivel mundial con tecnología CMOS.

1.2.1. Descripción general

La fotónica de silicio es la tecnología que permite integrar un gran número de funciones ópticas en un chip, utilizando las tecnologías de fabricación de la industria CMOS (Figura 1.2), lo que permite una fabricación de gran volumen y bajo costo [2] [3]. Este campo ha evolucionado rápidamente desde un "hot topic científico"hasta una plataforma industrialmente viable, impulsada por aplicaciones de telecomunicaciones y comunicación de datos, y facilitado por el creciente número de instalaciones de fabricación y prototipado (fabs) [33].

Hoy coexisten una amplia diversidad de plataformas tecnológicas para construir circuitos integrados fotónicos (PICs-*Photonic Integrated Circuits*) [34], utilizando diferentes sistemas de materiales como semiconductores III-V, niobato de litio, vidrios y nitruros de alto índice, polímeros y, por supuesto, el silicio (Figura 1.4).

Lo que hace que la fotónica de silicio sea una tecnología única es exactamente su compatibilidad con los procesos de fabricación y las herramientas utilizadas en la industria CMOS: esto ofrece una ruta hacia la fabricación de gran volumen a un coste por dispositivo potencialmente bajo.

La segunda característica única de la fotónica de silicio es su alto contraste de

índice de refracción (Figura 1.3), que permite dimensiones de guía de onda submicrométricas, curvaturas cerradas y espacios reducidos y, a su vez, esto permite un empaquetado denso de funciones ópticas en la superficie de un chip [35].

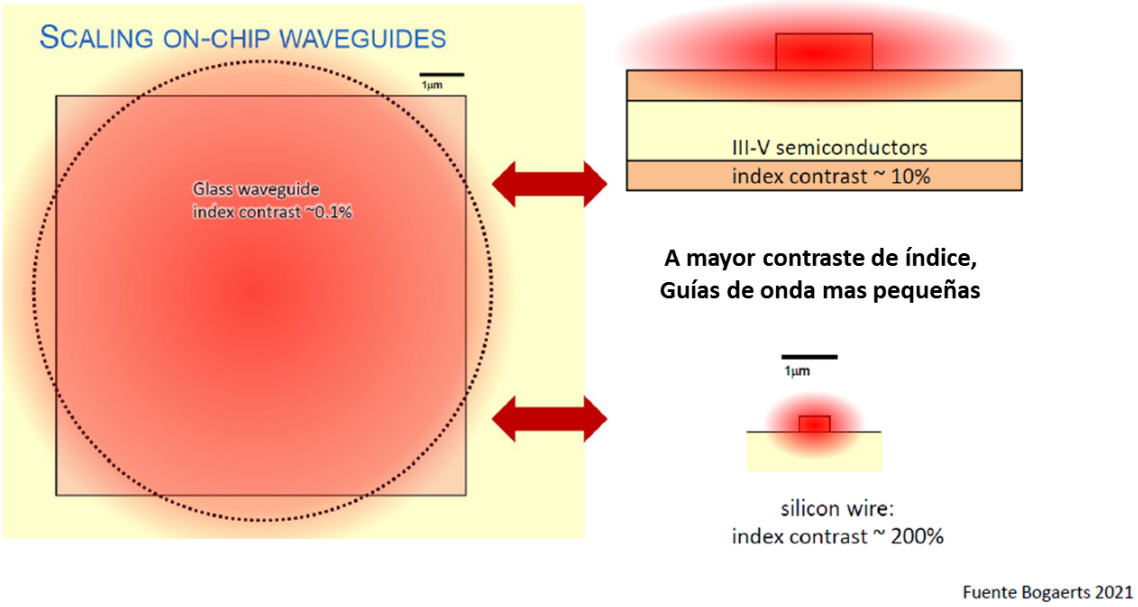


Figura 1.3: Escalado de guías de ondas por el contraste del índice.

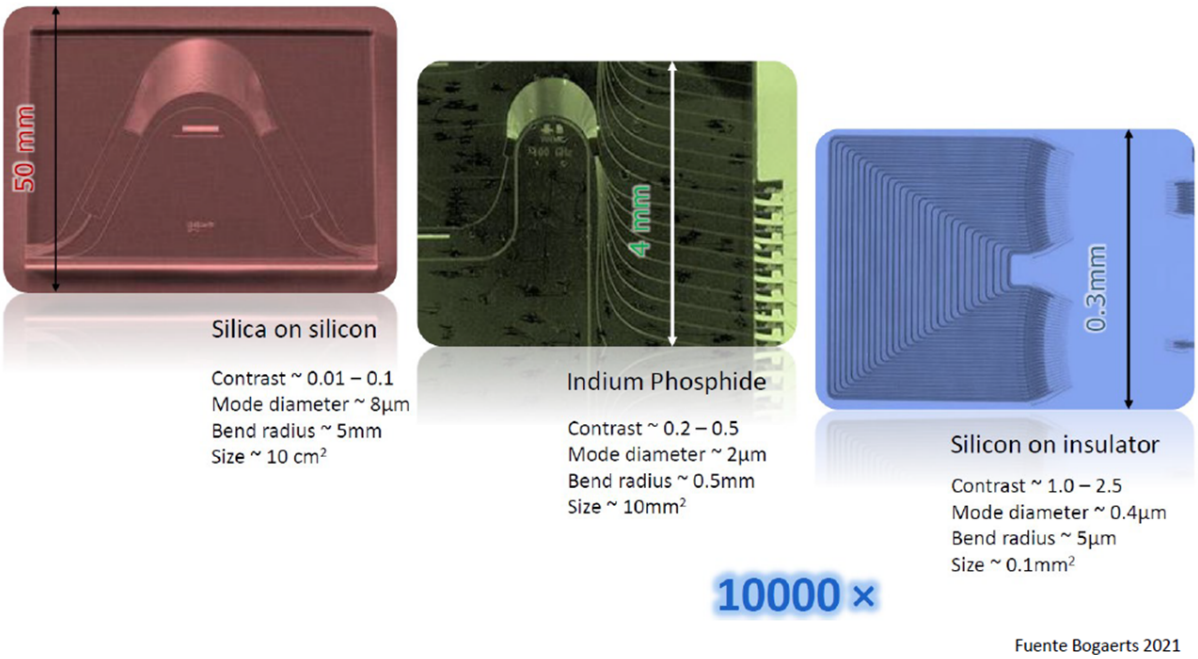


Figura 1.4: Imágenes de AWGs fabricados con diferentes nodos tecnológicos. Se compara el área final del dispositivo. A la izquierda guías de vidrio (*Silica on Silicon*), en el medio guías con materiales III-V (*Indium Phospide*) y la derecha guías de silicio (*Silicon On Insulator*).

Esta combinación convierte a la fotónica de silicio en la única plataforma tecnológica viable para circuitos integrados fotónicos de alta complejidad y gran escala. Sin embargo, el alto contraste del índice de refracción tiene un punto débil: impone requisitos muy estrictos sobre las dimensiones de los circuitos fotónicos de silicio, ya que las variaciones a escala nanométrica en el ancho o el espesor del núcleo de la guía de ondas pueden tener efectos no despreciables en el rendimiento de los circuitos fotónicos[36]. Esto implica que la variabilidad introducida por el proceso de fabricación puede tener un impacto significativo en el rendimiento general de un circuito. Los circuitos grandes y complejos sufrirán automáticamente más variabilidad que los circuitos simples. Al final, es el rendimiento global de un circuito lo que determina si es comercialmente viable. A medida que las tecnologías de fabricación CMOS continúan avanzando, se requiere una litografía de mayor precisión para fabricar dispositivos cada vez más pequeños. Mientras que los transistores continúan reduciéndose de tamaño, los dispositivos fotónicos son fundamentalmente limitados y permanecen aproximadamente constantes en función del nodo tecnológico (por ejemplo, un modulador en anillo tiene un tamaño fijo determinado por el rango espectral libre del objetivo de diseño). El beneficio de una mejor fabricación es que reduce la variabilidad de fabricación y mejora el rendimiento [37].

Sin embargo, hoy en día se considera que los procesos fotónicos de silicio son suficientemente buenos para una serie de aplicaciones, como lo demuestran los productos lanzados al mercado. Las diversas fábricas proporcionan procesos para guías de ondas de silicio con pérdidas de propagación aceptables de alrededor de 1,2 dB cm^{-1} [38], sintonizadores térmicos con eficiencias de desfasaje que van desde 100 $\mu W\pi^{-1}$ a 100 mW π^{-1} [39], moduladores electro-ópticos basados en portadoras que funcionan tanto en modo de onda viajera como resonante [40] y fotodetectores de Germanio con eficiencias de $\approx 1AW^{-1}$ [41], con moduladores y detectores funcionando a altas velocidades de varias decenas de giga-hercios. Los filtros espectrales se pueden implementar utilizando combinaciones de guías de ondas y estructuras de acoplamiento [42]. Si bien la mayoría de las tecnologías fotónicas de silicio operan alrededor de longitudes de onda en las bandas de telecomunicaciones tradicionales entre 1.2 y 1.6 μm, el rango de longitud de onda se puede extender al dominio visible utilizando nitruro de silicio [43]. Las obleas "Silicio Sobre Aislante" (SOI-*Silicon On Insulator*), con silicio como núcleo de guía de ondas y dióxido de silicio como revestimiento, se pueden utilizar hasta 3,6 μm (limitado por la absorción de dióxido de silicio), y se puede acceder a longitudes de onda aún más largas en el infrarrojo medio utilizando guías de ondas de germanio.

sobre un sustrato de silicio [44]. Estas tecnologías no pierden su compatibilidad con las tecnologías de fabricación CMOS y su gran capacidad de integración, por lo tanto, caen bajo la misma definición de fotónica de silicio.

La fotónica de silicio se considera una tecnología habilitadora para la biodetección y el diagnóstico, espectroscopia, monitoreo estructural, información cuántica/computación cuántica, fotónica de microondas, y se puede aplicar para diversas funciones de sensores (acelerómetros, giroscopios, campos magnéticos), etc. Dichas aplicaciones requerirán diseños de chips personalizados con requisitos muy diferentes entre cada uno y respecto de los *transceivers* para aplicaciones de centros de datos y telecomunicaciones.

Los avances en los procesos de fabricación de fotónica de silicio ahora permiten desarrollar circuitos grandes y complejos con pérdidas en las guías de onda inferiores a 1 dB cm^{-1}, además de cruces, divisores, acopladores, moduladores eficientes y fotodetectores excelentes, todo integrado en plataformas tecnológicas controladas mediante el control estadístico del proceso (SPC) [45]. Aunque aún hay espacio para mejoras tecnológicas, la complejidad de los circuitos ópticos está principalmente limitada por nuestra capacidad para diseñarlos, considerando las variaciones y efectos no deseados en el proceso de fabricación. Hoy en día, muchos diseñadores de circuitos fotónicos utilizan métodos manuales para crear sus diseños, enfocándose en la geometría física, algo reminiscente de los primeros diseños de circuitos electrónicos en las décadas de 1960 y 1970.

Los circuitos fotónicos integrados son similares a los circuitos electrónicos integrados en muchos aspectos. Se fabrican utilizando procesos planares en obleas de semiconductores. La funcionalidad se describe y modela como un circuito, donde las señales se mueven entre los bloques funcionales. Al igual que en la electrónica, la funcionalidad de un circuito fotónico no depende de un solo componente, sino de la interconexión entre varios bloques funcionales y subcircuitos. El diseño de los chips se concreta en un conjunto de "capas de máscara" geométricas que contienen los patrones para cada etapa de procesamiento planar. Los primeros circuitos fotónicos integrados se concebían como dispositivos individuales y se simulaban generalmente utilizando técnicas aproximadas de simulación electromagnética, como los métodos de propagación de haz (BPM), diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD), entre otras.

La Figura 1.5 resume lo mencionado anteriormente. Se muestra ilustrativamente como trasladar "una idea hacia un chip" con la tecnología fotónica del silicio, y es la metodología que se utilizó en el recorrido de esta tesis, para desarrollar dispositivos fotónicos integrados en silicio.

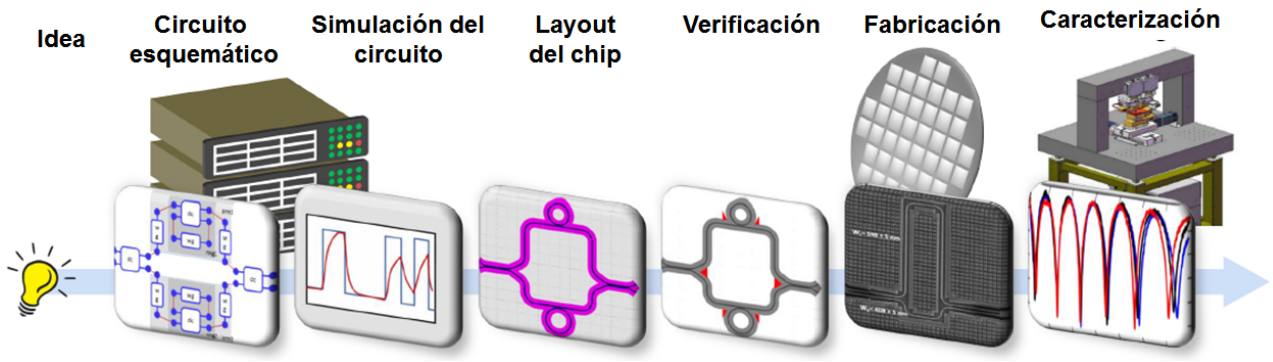


Figura 1.5: Metodología utilizada en este trabajo para desarrollar circuitos fotónicos integrados.

Referencias

[1] L. Shen, W. Zhang e Y. Zhang. «Photonic integrated circuits: Materials, technology and design». En: *Materials Science and Engineering: R: Reports* 137 (2020), págs. 100-129. DOI: 10.1016/j.mser.2019.100455.

[2] Lukas Chrostowski y Michael Hochberg. *Silicon Photonics Design: From Devices to Systems*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2015.

[3] D. Thomson, A. Zilkie, J. E. Bowers et al. «Roadmap on Silicon Photonics». En: *Journal of Optics* 18.7 (2016), pág. 073003. DOI: 10.1088/2040-8978/18/7/073003.

[4] R. Soref. «The Past, Present, and Future of Silicon Photonics». En: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 12.6 (2006), págs. 1678-1687. DOI: 10.1109/JSTQE.2006.883151.

[5] C. Sun, M. T. Wade, Y. Lee et al. «Single-chip microprocessor that communicates directly using light». En: *Nature* 528 (2015), págs. 534-538. DOI: 10.1038/nature16454.

[6] G. Lifante. *Integrated Photonics: Fundamentals*. London: John Wiley y Sons, 2003.

[7] X. Zheng, G. Li, A. V. Krishnamoorthy et al. «Exploiting CMOS manufacturing to reduce tuning requirements for resonant optical devices». En: *IEEE Photonics Journal* 3.3 (2011), págs. 567-579. DOI: 10.1109/JPHOT.2011.2140367.

[8] Laurent Vivien y Lorenzo Pavesi. *Handbook of Silicon Photonics*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013.

[9] L. Pavesi y D. J. Lockwood. *Silicon Photonics*. Vol. 94. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. ISBN: 978-3540420293.

[10] Graham T. Reed et al. «Silicon optical modulators». En: *Nature Photonics* 4 (2010), págs. 518-526. DOI: 10.1038/nphoton.2010.179.

[11] M. Smit y C. Van Dam. «PHASAR-based WDM-devices: Principles, design and applications». En: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 2.2 (1996), págs. 236-250. DOI: 10.1109/2944.571757.

[12] Bahram Jalali y Sasan Fathpour. «Silicon photonics». En: *Journal of Lightwave Technology* 24.12 (2006), págs. 4600-4615. DOI: 10.1109/JLT.2006.885782.

[13] F. Xia, L. Sekaric e Y. A. Vlasov. «Ultracompact optical buffers on a silicon chip». En: *Nature Photonics* 1 (2007), págs. 65-71. DOI: 10.1038/nphoton.2006.54.

[14] David A. B. Miller. «Device requirements for optical interconnects to silicon chips». En: *Proceedings of the IEEE* 97.7 (2009), págs. 1166-1185. DOI: 10.1109/JPROC.2009.2014298.

[15] Dries Van Thourhout, Gunther Roelkens, Joost Brouckaert et al. «Silicon photonics: silicon nitride versus silicon-on-insulator». En: *Proceedings of the 9th International Conference on Group IV Photonics (GFP)*. 2012, págs. 4-6. DOI: 10.1109/GROUP4.2012.6324003.

[16] R. Takahashi, T. N. Van V., M. Tien et al. «High confinement waveguides and microring resonators in silicon-on-insulator». En: *Optics Express* 14.22 (2006), págs. 10288-10297. DOI: 10.1364/OE.14.010288.

[17] W. Bogaerts, R. Baets, P. Dumon et al. «Nanophotonic waveguides in silicon-on-insulator fabricated with CMOS technology». En: *Journal of Lightwave Technology* 23.1 (2005), págs. 401-412. DOI: 10.1109/JLT.2004.834471.

[18] J. Notaros, M. T. Wade, C. M. Sorace-Agaskar et al. «A 25 Gbps, low power, compact, 1×4 wavelength-division multiplexed silicon photonic switch». En: *Optics Express* 22.24 (2014), págs. 29186-29204. DOI: 10.1364/OE.22.029186.

[19] Govind P. Agrawal. *Fiber-Optic Communication Systems*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2002. ISBN: 978-0471215714.

[20] Jeff Hecht. *Understanding Fiber Optics*. Harlow: Pearson Education, 2015.

[21] Allan W. Snyder y John D. Love. *Optical Waveguide Theory*. London: Chapman y Hall, 1983.

[22] Cisco. *Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2016–2021*. Inf. téc. 2017.

[23] Rodney S. Tucker. «Green optical communications—Part II: Energy limitations in networks». En: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 17.2 (2011), págs. 261-274. DOI: 10.1109/JSTQE.2010.2096228.

[24] Christian Koos, Patrick Vorreau, Thomas Vallaitis et al. «All-optical high-speed signal processing with silicon–organic hybrid slot waveguides». En: *Nature Photonics* 3 (2009), págs. 216-219. DOI: 10.1038/nphoton.2009.25.

[25] Qianfan Xu et al. «Micrometre-scale silicon electro-optic modulator». En: *Nature* 435 (2004), págs. 325-327. DOI: 10.1038/nature03569.

[26] Gustavo A Torchia et al. «Femtosecond laser written surface waveguides fabricated in Nd: YAG ceramics». En: *Optics Express* 15.20 (2007), págs. 13266-13271.

[27] W. M. J. Green et al., eds. *Silicon Photonics*. Cambridge University Press, 2010.

[28] L. Chen y L. P. Lee, eds. *Integrated Nanophotonic Devices*. CRC Press, 2013.

[29] Simon M. Sze. *Semiconductors III-V: Physics, Materials, and Devices*. 2nd. Includes coverage on InP and GaAs for light sources and detection. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

[30] Jean-Emmanuel Broquin y Seppo Honkanen. «Integrated Photonics on Glass: A Review of the Ion-Exchange Technology Achievements». En: *Applied Sciences* 11 (mayo de 2021), pág. 4472. DOI: 10.3390/app11104472.

[31] S. N. Khonina et al. «Polymer Waveguide-Based Optical Sensors—Interest in Bio, Gas, Temperature, and Mechanical Sensing Applications». En: *Coatings* 13.3 (2023), pág. 549. DOI: 10.3390/coatings13030549. URL: https://doi.org/10.3390/coatings13030549.

[32] Le Nguyen Binh. «Lithium niobate optical modulators: Devices and applications». En: *Journal of Crystal Growth* 288.1 (2006), págs. 180-187. ISSN: 0022-0248. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2005.12.020. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002202480501506X.

[33] A. J. Lim et al. «J. Sel. Top. Quantum Electron.» En: 20 (2014), pág. 405.

[34] M. Wale. «Advanced Photonics Congress». En: *Optical Society of America*. Colorado Springs, Colorado, United States, 2012, JTu1B.1.

[35] «D. X. Xu, J. H. Schmid, G. T. Reed, G. Z. Mashanovich, D. J. Thomson, M. Nedeljkovic, X. Chen, D. V. Thourhout, S. Keyvaninia, S. K. Selvaraja». En: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 20 (2014), pág. 189. DOI: 10.1109/JSTQE.2013.2296092.

[36] S. Selvaraja et al. «Photonics Conference (IPC)». En: *2012 IEEE Photonics Conference (IPC)*. Burlingame, CA, USA, 2012, págs. 725-726.

[37] S. K. Selvaraja et al. «Optical Fiber Communication Conference». En: *Optical Fiber Communication Conference*. San Francisco, CA, USA: OSA, 2014, Th2A-33.

[38] P. Verheyen et al. «SPIE Photonics Europe». En: *SPIE Photonics Europe*. Brussels, Belgium: SPIE, 2012, pág. 843114.

[39] Z. Lu et al. «Photonics Conference (IPC)». En: *2016 IEEE Photonics Conference (IPC)*. Waikoloa, HI, USA: IEEE, 2016, págs. 107-110.

[40] G. T. Reed et al. En: *Nature Photonics* 4 (2010), pág. 518.

[41] L. Chen y M. Lipson. En: *Optics Express* 17 (2009), pág. 7901.

[42] W. Bogaerts et al. «SPIE OPTO». En: *SPIE OPTO*. San Francisco, CA, USA: SPIE, 2015, 93650H.

[43] A. Subramanian et al. En: *Photonics Research* 3 (2015), B47.

[44] R. Soref. En: *Nature Photonics* 4 (2010), pág. 495.

[45] F. Boeuf et al. «Title of the Paper». En: *Optical Fiber Communication Conference*. 2015, W3A-1.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

Índice

2.1. Plataformas tecnológicas de la Fotónica de Silicio. 23
2.1.1. Nitruro de Silicio (Silicon Nitride). 23
2.1.2. Silicio Sobre Aislante (Silicon on Insulator). 25
2.2. Guías de onda ópticas integradas. 28
2.2.1. Estructura de las guías de ondas. 28
2.2.2. Propagación de ondas en guías de ondas ópticas planas. 29
2.2.3. Guía de onda canalizadas, modos cuasi-TE y cuasi-TM 34
2.2.4. Tipo de guías de onda. 34
2.2.5. Resolución numérica de guías de onda. 36
2.3. Análisis espectroscópico del infrarrojo cercano NIRS 41
2.3.1. Teoría de la espectroscopia vibracional 42
2.3.2. Region espectral NIR 46

Esta tesis se enfocó en las dos plataformas tecnológicas más utilizadas en la industria de la fotónica del silicio: Nitruro de Silicio (Si_3N_4 - *Silicon Nitride*) y Silicio Sobre Aislante (SOI - *Silicon on Insulator*). Los procesos de micro-fabricación se llevaron a cabo utilizando la tecnología del Si_3N_4 en la sala limpia del Departamento de Micro y Nanotecnología (DMNT-CNEA), mientras que la evaluación del rendimiento de varios dispositivos de interés, se realizó con la tecnología SOI fabricados en el exterior (Cardiff-Reino Unido). A continuación, se presenta una breve descripción de ambas plataformas tecnológicas.

2.1. Plataformas tecnológicas de la Fotónica de Silicio.

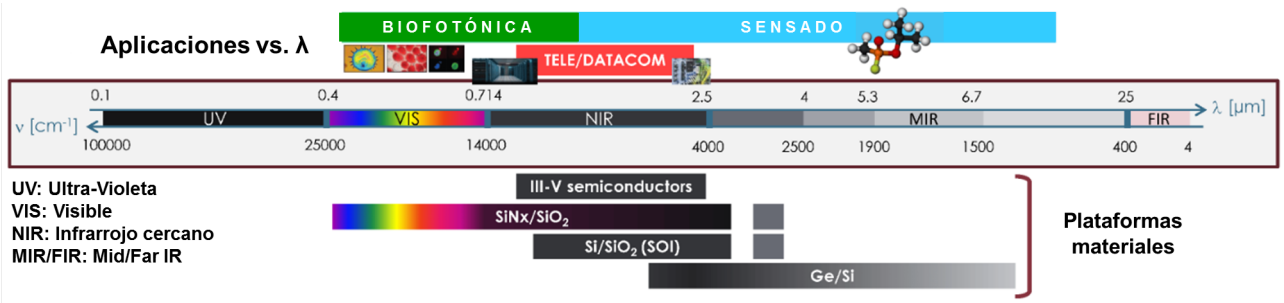


Figura 2.1: Aplicaciones vs. rango de longitud de onda y los diferentes sistemas de materiales, semiconductores III-V y fotónica de silicio, comúnmente empleados en la integración fotónica genérica (Referencia [1], adaptado con permiso de OSA Publishing)

2.1.1. Nitruro de Silicio (Silicon Nitride).

La plataforma fotónica del nitruro de silicio, emplea nitruro de silicio estequiométrico (SiN) como capas de guía de ondas, las cuales están rellenas y encapsuladas con sílice (SiO_2) como capas de revestimiento sobre una oblea de silicio (Si), así como se muestra en la Figura 2.2.

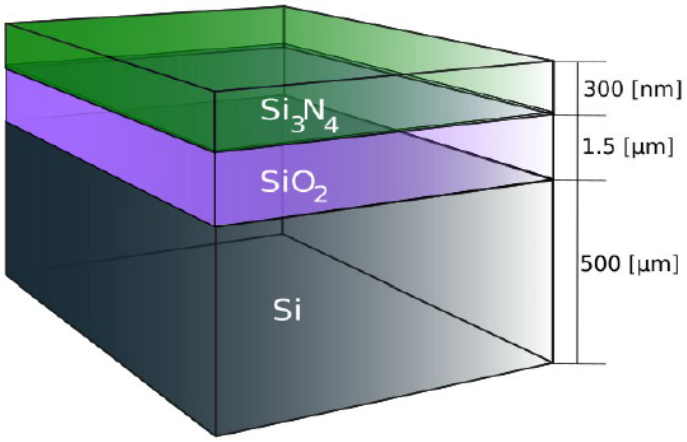


Figura 2.2: Estructura y dimensiones de la plataforma: 300 nm, Si_3N_4 y guías de onda tipo STRIP, $\lambda = 1550[nm]$. Con esta plataforma se fabricaron guías de onda.

La plataforma de guía de ondas planas de Nitruro de Silicio, ha permitido una amplia clase de dispositivos integrados planos de baja pérdida y soluciones a escala de chip que se benefician de su transparencia en un amplio rango de longitudes de onda (400-2350 nm) y la fabricación utilizando procesos de escala con *wafers* [2]. El nitruro de silicio recubierto con sílice presenta un contraste de

índice ($\triangle n \sim 0{,}5$) no es tan elevado como en el caso del silicio sobre aislante ($\triangle n \sim 2{,}5$), esto conduce a una disminución en las pérdidas y la susceptibilidad a defectos durante la fabricación, así como a una menor incidencia de diafonía o *crosstalk*, mientras se conserva un tamaño compacto. Las pérdidas se reducen considerablemente, hasta uno o dos órdenes de magnitud en comparación con las observadas en SOI. Además, otra característica destacada es la no linealidad. Como plataforma complementaria a la fotónica de silicio sobre aislante (SOI) y III-V, la tecnología de guía de ondas Si_3N_4 abre una nueva generación de aplicaciones de sistema en chip que no se pueden lograr solo con las otras plataformas.

La disponibilidad de guías de ondas de baja pérdida ($< 1dB/m$) que pueden manejar alta potencia óptica se pueden diseñar para funciones ópticas lineales y no lineales, y que admiten una variedad de bloques de construcción pasivos y activos, abre nuevas vías para la implementaciones de los *system-on-chip*. A medida que el ancho de banda de la señal y las velocidades de datos continúan aumentando, las funciones y la complejidad del circuito óptico posibles con Si_3N_4 han ampliado la aplicación práctica de las funciones de procesamiento de señales ópticas que pueden reducir el consumo de energía, el tamaño y el costo en comparación con las soluciones electrónicas digitales actuales. Los investigadores han podido llevar el rendimiento de los componentes fotónicos integrados más allá de otras plataformas integradas, incluidos resonadores Q ultra-altos, filtros ópticos, láseres altamente coherentes, circuitos de procesamiento de señales ópticas, dispositivos ópticos no lineales, generadores de peine de frecuencia y sistemas biofotónicos en chips.

La forma estequiométricamente estable del nitruro de silicio es Si_3N_4, siendo esta la más usada para aplicaciones fotónicas. Adicionalmente, la técnica de deposición que presenta mejores prestaciones en el rango de las comunicaciones ópticas es la deposición química de vapor a baja presión (LPCVD) a alta temperatura, mayores a 700^oC. A continuación se transcribe la relación de dispersión de Si_3N_4 depositado por LPCVD para longitudes de onda entre 310 y 5504 nm [3]

$$n^2_{Si_3N_4}(\lambda) = 1 + \frac{3{,}0249\lambda^2}{\lambda^2 - 135{,}3406^2} + \frac{40314\lambda^2}{\lambda^2 - 12398422^2} \tag{2.1}$$

donde la longitud de onda λ está dada en nm.

La variación del índice de refracción respecto de la temperatura, para condiciones ambiente en el entorno de los 25°C y en el entorno de 1.55 μm, puede aproximarse como $\frac{\mathrm{d}n_{Si_3N_4}}{\mathrm{d}T} \approx 2{,}45 \times 10^{-5}\,(\mathrm{RIU}/^{\circ}\mathrm{C})$ [4], en donde RIU indica la unidad de índice de refracción (*Refractive Index Unit*).

Características principales de Si_3N_4 en chips fotónicos.

- Índice de Refracción: El nitruro de silicio tiene un índice de refracción relativamente alto, lo que facilita la confinación de la luz en guías de ondas y otros dispositivos fotónicos.
- Transparencia Óptica: Es transparente en una amplia gama de longitudes de onda en el espectro visible y al infrarrojo cercano, lo que lo hace adecuado para amplia gama de aplicaciones fotónicas en distintas ramas de la ciencia experimental.
- Propiedades Dieléctricas: Como dieléctrico, el nitruro de silicio proporciona aislamiento eléctrico y es útil para crear estructuras que confinen y guíen la luz sin interferencias eléctricas.
- Estabilidad Térmica: Exhibe una buena estabilidad térmica, lo que lo hace resistente a temperaturas elevadas y adecuado para procesos de fabricación que pueden involucrar etapas térmicas.
- Amplio Uso en Moduladores y Otros Dispositivos: El nitruro de silicio se utiliza comúnmente en la fabricación de moduladores electro-ópticos, acopladores y otros componentes fotónicos clave.

2.1.2. Silicio Sobre Aislante (Silicon on Insulator).

En la última década, el Silicio Sobre Aislante o SOI (por sus siglas en inglés), se ha convertido en un material atractivo y el más empleado para el desarrollo de dispositivos fotónicos compactos [5]. Hay tres razones clave para esto. En primer lugar, el silicio cristalino es un material óptico excepcionalmente bueno, con una absorción muy baja en longitudes de onda superiores a 1200 nm. Esta región contiene los rangos de longitud de onda de telecomunicaciones más utilizados, alrededor de 1310 y 1550 nm. En segundo lugar, el contraste del índice de refracción entre el silicio y el dióxido de silicio es mayor que el de cualquier otro sistema de combinación de materiales para la fotónica integrada, un contraste de índice de refracción alto permite un mayor confinamiento de la luz en una sección transversal de guía de onda por debajo de la longitud de onda, y además, permite la integración a mayor escala de componentes fotónicos en un chip. La tercera razón por la que SOI se convirtió en un sustrato fotónico importante, es su compatibilidad con los procesos de fabricación CMOS. Las obleas comerciales más comúnmente empleadas en SOI son idénticas a las utilizadas en la industria

electrónica para la fabricación de circuitos de alto rendimiento. Estas obleas están compuestas por un sustrato de silicio, una capa aislante de dióxido de silicio de 2 μm de espesor (conocida como óxido enterrado o BOX) y una película de silicio cristalino intrínseco con un grosor de 220 nm o de 340 nm.

La capa superior de silicio cristalino es la región donde se diseñan las guías de onda y los dispositivos, por lo que sus propiedades son críticas para el diseño de dispositivos fotónicos. Las pérdidas típicas en las guías de onda fabricadas con tecnología SOI se sitúan en torno a 2-3 dB/cm, principalmente debido al *scattering* causado por la rugosidad en las paredes laterales. A continuación, presentamos la relación de dispersión del silicio, basada en el modelo de Lorentz y aplicada al rango de comunicaciones ópticas, sin considerar las pérdidas por absorción. [6]:

$$n_{Si}^2(\lambda) = \epsilon + \frac{\omega_0^2 \epsilon_{\text{Lorent } z}}{\omega_0^2 - (2\pi c/\lambda)^2} \tag{2.2}$$

donde $\epsilon = 7{,}9874$, $\epsilon_{\text{Lorentz}} = 3{,}688$ y $\omega_0 = 3{,}9328 \times 10^{15}$.

Los cambios en el índice de refracción del silicio debido a efectos térmicos se producen por alteraciones en la distribución de portadores de carga, fonones y una contracción o expansión de la banda prohibida. Para las longitudes de onda típicas de las comunicaciones ópticas, la variación del índice puede aproximarse como [7]:

$$\beta_{Si} = \frac{1}{n_{Si}} \frac{\mathrm{d}n_{Si}}{\mathrm{d}T} = 5{,}2 \times 10^{-5} \mathrm{°C}^{-1} \tag{2.3}$$

por ejemplo, para una longitud de onda de 1.55 μm $\frac{\mathrm{d}n_{Si}}{\mathrm{dT}} \approx 1{,}8 \times 10^{-4}$ (RIU/°C)

Donde RIU es la designación empleada para denotar la unidad de cambios en el índice de refracción, abreviatura del término en inglés "Refractive Index Units".

El dióxido de silicio (SiO_2), conocido como vidrio o sílice, exhibe un índice de refracción prácticamente invariable en las longitudes de onda empleadas en las comunicaciones ópticas. En comparación con el silicio, tanto la dispersión como la variación del índice con respecto a la temperatura son aproximadamente seis veces menores. En la mayoría de los casos, excepto en situaciones particulares como las guías de onda ranuradas, la mayor parte de la luz se encuentra confinada en el núcleo de silicio, lo que limita la relevancia de los cambios en el índice en el dióxido de silicio. Por lo tanto, es apropiado aproximar el índice de refracción de SiO_2 como constante, con un valor de 1.45 en el rango de 1.55 μm, lo que resulta en una notable reducción en los tiempos de simulación. En este caso, el error es insignificante; por ejemplo, para guías de onda rectangulares monomodo estándar

(500 x 220 nm como se muestra en la Figura 2.3), la diferencia en el índice de grupo es del 0.1 %.

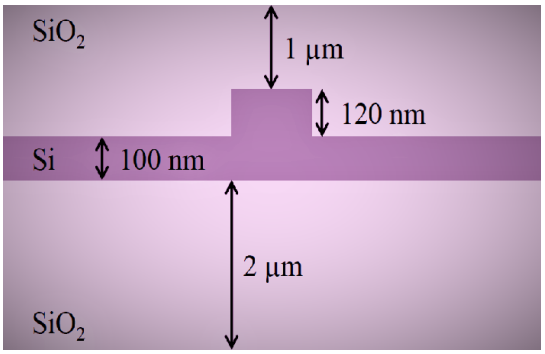


Figura 2.3: Estructura y dimensiones de la plataforma: 220 nm SOI y guías de onda tipo RIB, $\lambda = 1550[nm]$. Con esta plataforma se midió la transmisión en los splitters.

Características principales del SOI en chips fotónicos.

- Substrato de Silicio: En la tecnología SOI, se utiliza un sustrato de silicio como base para el chip. Este sustrato proporciona una plataforma robusta y bien establecida para la integración de componentes fotónicos.
- Capa Aislante: La capa aislante, típicamente de óxido de silicio (SiO_2), se coloca entre el sustrato de silicio y la capa superior de silicio cristalino. Esta capa aislante, también conocida como BOX (*Buried Oxide*), sirve para aislar eléctricamente los componentes fotónicos de los componentes electrónicos y reducir las pérdidas ópticas.
- Silicio Cristalino Intrínseco: Encima de la capa aislante se encuentra una capa de silicio cristalino intrínseco, donde se definen y fabrican los componentes fotónicos, como guías de onda, moduladores y detectores. Esta capa proporciona un sustrato óptico de alta calidad para la propagación de la luz.
- Confinamiento de Luz: La tecnología SOI ofrece un alto grado de confinamiento de luz en el silicio cristalino, lo que permite una transmisión eficiente de la señal óptica a través de los dispositivos fotónicos.
- Compatibilidad CMOS: Una ventaja significativa del SOI es su compatibilidad con la tecnología CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*), lo que permite la integración de circuitos electrónicos y fotónicos en un solo chip. Esto facilita la fabricación de sistemas fotónicos complejos con funciones de control y procesamiento integradas.

2.2. Guías de onda ópticas integradas.

2.2.1. Estructura de las guías de ondas.

Las fibras ópticas y las guías de ondas ópticas constan de un núcleo, en el que se confina la luz, y un revestimiento o sustrato que rodea el núcleo, como se muestra en la figura 2.4 El índice de refracción del núcleo n_1 es mayor que el del revestimiento (*cladding*) n_0. En un modelo simple de rayos, el haz de luz que está acoplado a la cara extrema de la guía de onda queda confinado en el núcleo por reflexión interna total. La condición para la reflexión interna total en la interfaz *núcleo-cladding* está dada por $n_1 \sin(\pi/2 - \phi) \geqslant n_0$. Dado que el ángulo ϕ está relacionado con el ángulo incidente θ por $\sin\theta = n_1 \sin\phi \leqslant \sqrt{n_1^2 - n_0^2}$, obtenemos la condición crítica para la reflexión total interna como:

$$\theta \leqslant \sin^{-1}\sqrt{n_1^2 - n_0^2} \equiv \theta_{\text{máx}} \tag{2.4}$$

La diferencia del índice de refracción entre el núcleo y el *cladding* en una fibra óptica es del orden de $n_1 - n_0 = 0{,}01$. Luego θ_{max} en 2.4 puede aproximarse mediante

$$\theta_{\text{max}} \cong \sqrt{n_1^2 - n_0^2} \tag{2.5}$$

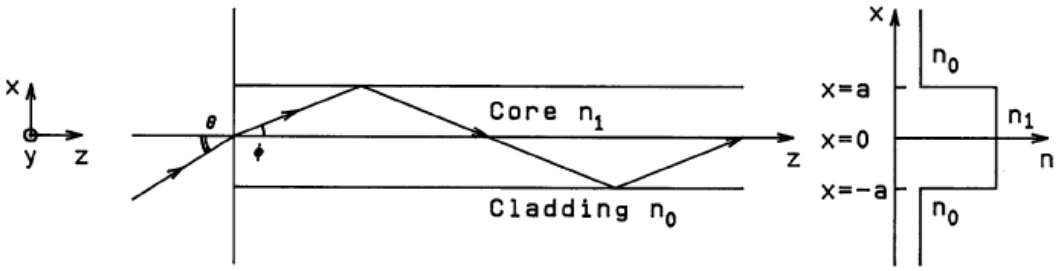


Figura 2.4: Estructura básica y perfil de índice de refracción en una guía de onda óptica.

θ_{max} denota el ángulo máximo de aceptación de luz de la guía de onda y se conoce como apertura numérica (NA).

La diferencia relativa del índice de refracción entre n_1 y n_0 se define como:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_0^2}{2n_1^2} \cong \frac{n_1 - n_0}{n_1} \tag{2.6}$$

Δ comúnmente se expresa como porcentaje. La apertura numérica NA está relacionada con la diferencia relativa del índice de refracción Δ por:

$$\mathrm{NA} = \theta_{\max} \cong n_1\sqrt{2\Delta} \tag{2.7}$$

El ángulo máximo para la luz que se propaga dentro del núcleo está dado por $\phi_{\max} \cong \theta_{\max}/n_1 \cong \sqrt{2\Delta}$. Para guías de ondas ópticas típicas, NA $= 0.21$ y $\theta_{\max} = 12°(\phi_{\max} = 8{,}1°)$ cuando $n_1 = 1{,}47$, $\Delta = 1\,\%$ (para $n_0 = 1{,}455$).

2.2.2. Propagación de ondas en guías de ondas ópticas planas.

Un grupo de guías de onda, las llamadas guías de onda ópticas planas, pueden considerarse un subproducto de dos grandes industrias: las industrias de telecomunicaciones y semiconductores. Mientras que la primera condujo a métodos novedosos para acoplar, transferir, cambiar, multiplexar y demultiplexar luz en fibras ópticas para comunicación de alta velocidad, la segunda puede considerarse para el desarrollo de tecnologías para dominar la fabricación de complejos y miniaturizados sistemas ópticos integrados a nivel de oblea [8]. En su forma más simple, las guías de onda ópticas planas consisten en una estructura de tres capas, en la cual una película delgada (F) de espesor d_f es parte de un "sandwich" entre un sustrato (S) y un medio que lo cubre o rodea (C). Los índices de refracción de las capas son n_f, n_s, y n_c, respectivamente. Como se muestra en la Figura 2.5, la luz puede ser guiada en la película (guía de onda) por reflexión interna total, si el índice de refracción de la película es mayor que los de los medios circundantes ($n_c < n_f > n_s$) y si el ángulo de propagación de la luz en relación con la normal de la interfaz es mayor que los ángulos críticos en los dos límites ($\theta = \arcsin(n_c/n_f)$) basado en la ley de Snell) [9]. Sin embargo, pueden surgir modos de guía de onda y propagarse a través de la película sin ninguna pérdida de potencia (en el caso ideal, donde no ocurre dispersión ni absorción), si d_f es más grande que un espesor mínimo o "de corte", d_{fmin}, que es una función de los parámetros de guía de onda mencionados anteriormente y de la longitud de onda aplicada [10], y si los rayos de luz reflejados desde las interfaces logran interferencia constructiva. Como consecuencia de lo último, sólo existe un conjunto discreto de estados de guía de onda, es decir, modos guiados, en una configuración de guía de onda plana. Esta es la denominada condición de auto-coherencia de la interpretación clásica del modelo de "zig-zag" [11]. Es importante notar que si estas restricciones no se cumplen, la luz no puede ser confinada en la película, en consecuencia solo pueden observarse modos de radiación [12].

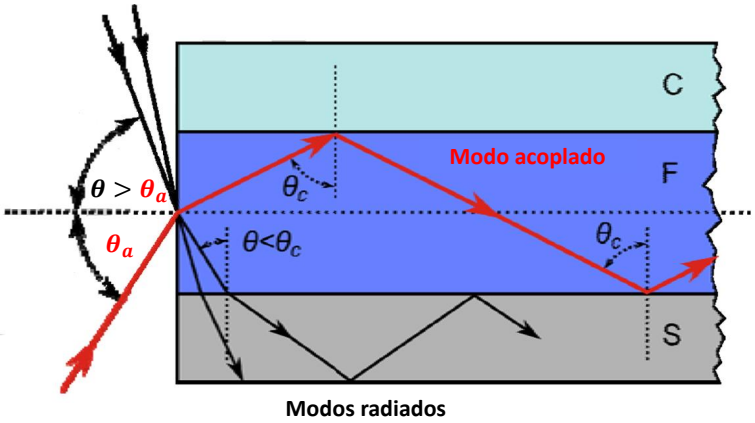


Figura 2.5: Propagación de ondas en una guía de onda óptica plana. La luz puede acoplarse y ser guiada por la guía de onda si se cumple $n_c < n_f > n_s$, y si el ángulo de propagación de la luz con respecto a la normal de la superficie de contacto es mayor que el ángulo crítico θ_c. Así mismo, la luz que entra en la guía de onda (izquierda) con un ángulo θ mayor que el máximo ángulo de aceptación θ_a, provocará la pérdida de modos de radiación.

Para comprender mejor este fenómeno, es necesario aplicar las ecuaciones de Maxwell y las condiciones de contorno adecuadas en capas homogéneas, estacionarias, no magnéticas, libres de fuentes y no conductoras de la configuración descrita anteriormente, como se analiza en [9]. Por otro lado, las condiciones de frontera tienen importantes consecuencias. No solo implican la ley de Snell y que los vectores de onda originales, refractados y reflejados deben estar en el mismo plano, sino también que la componente tangencial del vector de onda a través de una interfaz debe ser continuo.

Este criterio define una cantidad, el índice de refracción efectivo $N = k_t/k_0$ para guías de ondas planas $(n_S, n_C < N < n_F)$, donde $k_t \equiv \beta$ es el componente tangencial del vector de onda, conocido como constante de propagación. Esto refleja que N también puede ser introducido como $N = c_0/v_{\text{mode}}$, donde $v_{\text{mode}} = \omega/\beta$ es la velocidad de fase del modo guiado, c_0 es la velocidad de la luz en el vacío y ω es la frecuencia angular de la luz guiada. Por otro lado, en el caso de las guías de ondas planas, las soluciones de onda plana de las ecuaciones de Maxwell se dividen en dos conjuntos ortogonales de funciones. Solo se pueden excitar modos con dos polarizaciones diferentes; ya sea que el campo eléctrico total o el campo magnético total este oscilando en el plano de las interfaces (Figura 2.6). Estas polarizaciones se denominan, respectivamente, modos eléctricos transversales (TE) y modos magnéticos transversales (TM) [11]. Consideremos un sistema de coordenadas ortogonales general, donde los modos se propagan a lo largo del eje z. Además, los ejes x e y son perpendiculares y paralelos a las interfaces, respectivamente. Basándonos en la definición de modos TE y TM, concluimos que para

los campos eléctricos E y magnéticos H y, por consiguiente, para las condiciones de frontera:

TE: $E_x = 0, E_z = 0, H_y = 0, k_y = 0$, por lo tanto, $E_y, H_z, \dfrac{\partial E_y}{\partial x}$ son continuos,

TM: $E_y = 0, H_x = 0, H_z = 0, k_y = 0$, por lo tanto, $E_z, H_y, \dfrac{\partial H_y}{\partial x}$ son continuos.

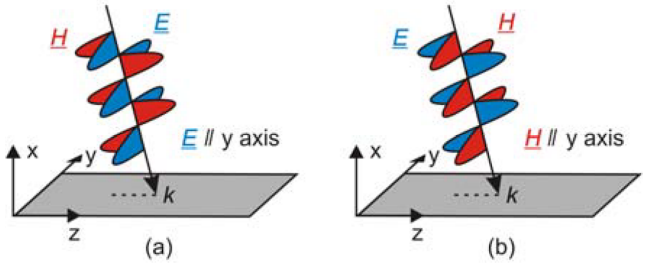


Figura 2.6: Visualización de los modos a.) TE y b.) TM. En guías de ondas ópticas planas, se pueden excitar modos con solo dos polarizaciones diferentes; en el plano de las interfaces oscila tanto el campo eléctrico total, así como el campo magnético total. Éstos son los modos TE y TM, respectivamente.

Expresando la ecuación de onda de Helmholtz [9] para estas especificidades, se puede revelar la siguiente relación para el componente x del vector de onda en el sustrato, la capa de película y las capas de recubrimiento de una guía de ondas óptica plana:

$$k_{x,X} = \pm k_0 \sqrt{n_X^2 - N^2}, \tag{2.8}$$

donde X denota S, F o C, respectivamente. En el caso de medios isotrópicos, n_X es un valor constante único y la solución de la ecuación 2.8 es independiente de las polarizaciones TE y TM. En el caso de medios anisotrópicos, n_X depende de la orientación. En consecuencia, es una matriz, lo que da lugar a soluciones diferentes para las polarizaciones TE y TM. Una descripción detallada de la anisotropía se puede encontrar en las referencias ([13] y [14]). Correlacionando con la ecuación 2.8, el campo electromagnético total dentro de la película de la guía de ondas se obtiene por la combinación lineal de una onda propagante hacia arriba, $U^+(x, z, t)$, y una onda propagante hacia abajo, $U^-(x, z, t)$:

$$U(x, z, t) = U^+(x, z, t) + U^-(x, z, t) \tag{2.9}$$

$$= \left(U_0^+ e^{ik_x(x-x_0)+\varphi^+} + U_0^- e^{-ik_x(x-x_0)+\varphi^-} \right) e^{iNk_0 - i\alpha t}, \tag{2.10}$$

donde $U = E, H$ y $U_0 = E_0, H_0$. (Se visualiza en la Figura 2.7.) Considerando las ecuaciones 2.8 y 2.10, se puede observar que la amplitud de las ondas pro-

pagantes se atenúa exponencialmente fuera de la película de la guía de ondas en función de la distancia medida desde la interfaz más cercana, ya que k_x se vuelve imaginario en el sustrato así como en los medios de recubrimiento. Este campo electromagnético que decae exponencialmente se denomina campo evanescente. La profundidad de penetración del campo evanescente (en otras palabras, la longitud de decaimiento de la intensidad del campo) se puede obtener expresando la ecuación 2.8 y la ecuación 2.10 para la capa de recubrimiento:

$$\delta_{x,C} = \left(k_0 \sqrt{N^2 - n_C^2} \right)^{-1}.$$

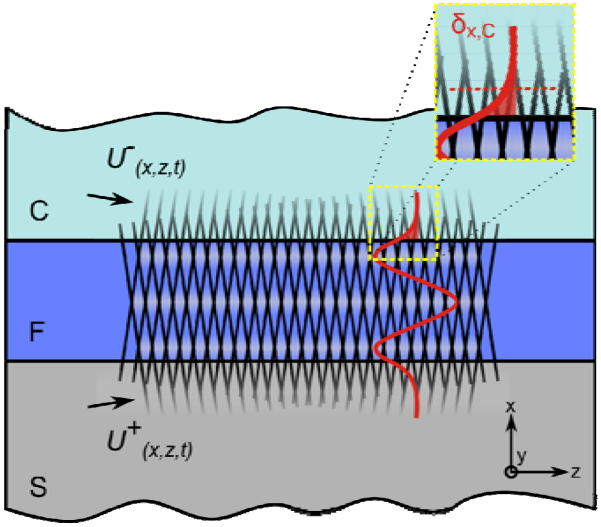


Figura 2.7: Visualización de la formación de modos en una guía de onda plana. El campo electromagnético total dentro de la película de la guía de onda está compuesto por la superposición de una onda propagante hacia arriba, $U^+(x,z,t)$, y una onda propagante hacia abajo, $U^-(x,z,t)$. Aquí, se muestra un modo de orden 2. El campo evanescente con la profundidad de penetración $\delta_{x,C}$ se magnifica en el recuadro.

Aplicando la ecuación 2.10 en el sustrato de la película y en las interfaces película/cubierta, donde $x = x_0$ y $x = x_0 + d_F$, respectivamente, las razones de las ondas propagantes hacia arriba y hacia abajo se pueden escribir en forma de los coeficientes de reflexión (complejos) de Fresnel r_S y r_C en las dos interfaces:

$$r_S = \frac{U_0^+}{U_0^-} = |r_S|\, e^{i\varphi_S} \quad \text{para} \quad x = x_0, \tag{2.11}$$

$$r_C = \frac{U_0^- e^{-ik_x d_F}}{U_0^+ e^{ik_x d_F}} = |r_C|\, e^{i\varphi_C} \quad \text{para} \quad x = x_0 + d_F. \tag{2.12}$$

donde φ_S y φ_C son los desplazamientos de fase debidos a la reflexión desde las interfaces. Los coeficientes de reflexión también se pueden expresar mediante los parámetros de la guía de ondas, como se describe con más detalle en la referencia [13]. Es importante enfatizar que son diferentes para los modos TE y TM; en consecuencia, las propagaciones de ondas TE y TM pueden realizarse bajo diferentes condiciones (también en el caso de medios isotrópicos). Insertando la ecuación 2.11 en la ecuación 2.12, se obtiene la ecuación del modo como:

$$r_S r_C e^{2ik_x d_F} = |r_S \cdot r_C| \, e^{i(\varphi_S+\varphi_C+2k_x d_F)} = 1,$$

la cual se puede reescribir para concluir con la ecuación clásica del modo:

$$2d_F k_x - \varphi_S - \varphi_C = 2\pi m,$$

donde m es el orden del modo. Como se ha demostrado, debido al tamaño y la forma de la sección transversal de la guía de onda, solo las distribuciones del campo electromagnético discretas caracterizadas por N_m o β_m (ec. 2.8) pueden ser guiadas, porque solo estas satisfacen las condiciones de frontera. La Figura 2.8 muestra los perfiles de distribución del campo de los primeros cuatro modos, es decir, TE_0, TM_0, TE_1 y TM_1 en guías de onda ópticas planas.

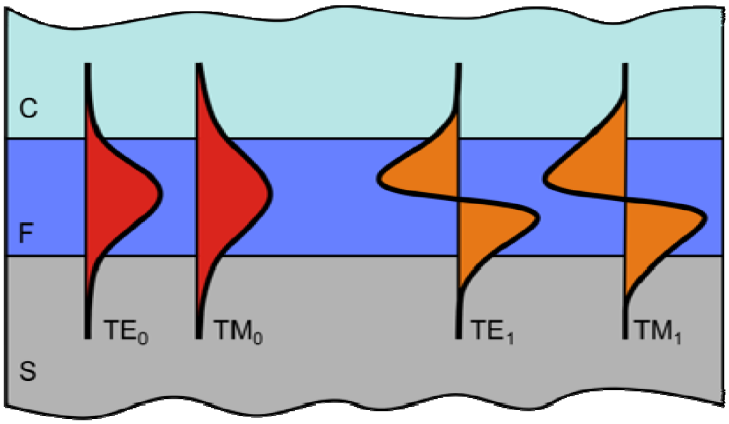


Figura 2.8: Visualización esquemática de los modos de la guía de onda en una guía de onda óptica plana. Se presentan, respectivamente, los perfiles de distribución del campo de los modos $m = 0$ (rojo) y $m = 1$ (naranja) para las polarizaciones TE y TM. Como se muestra, los modos TM penetran más profundamente en el medio circundante que los modos TE.

El número de modos de diferentes órdenes también está determinado por los parámetros optogeométricos. Los órdenes se cuentan desde cero refiriéndose a la forma de los frentes de onda [11]. El número de modos guiados disminuye con d_F y el contraste del índice de refracción entre la película y el entorno, o con el aumento de las longitudes de onda. Las guías de onda que no soportan ningún

modo están por debajo de $d_{F\,\text{mín}}$ para una longitud de onda dada, o viceversa, una cierta longitud de onda está por debajo de un valor determinado por la frecuencia de corte para una configuración de guía de onda dada [9]. En un caso especial, cuando d_F se elige para ser ligeramente más grueso que $d_{F\,\text{mín}}$, solo los modos fundamentales TE_0 y TM_0 pueden ser excitados y las guías de onda se llaman comúnmente guías de onda monomodo [11].

2.2.3. Guía de onda canalizadas, modos cuasi-TE y cuasi-TM

Cuando se trata de guías de onda planas, ya sean estructuras de índice escalonado o de índice gradual, la propagación de la luz puede describirse en términos de dos polarizaciones mutuamente ortogonales, estos son, los modos de propagación TE y TM. En contraste, en las guías de onda ópticas canalizadas no existen modos puros TE o TM, sino que hay dos familias de modos electromagnéticos transversales híbridos (TEM) [15].

Afortunadamente, los modos TEM que se propagan en las guías de onda canalizadas están fuertemente polarizados a lo largo de la dirección x o y (siendo z la dirección de propagación de la luz), y por lo tanto se puede hacer una clasificación según el componente principal del campo eléctrico asociado a la radiación electromagnética. Los modos ópticos que tienen como componente principal del campo eléctrico la dirección x se denominan modos $E_{x,pq}$, y se comportan de manera muy similar a los modos TM en una guía de onda plana. Por esta razón, se conocen como modos *cuasi-TM*. Los subíndices p y q indican el número de nodos del campo eléctrico E_x en las direcciones x e y, respectivamente.

De acuerdo con lo anterior, los modos $E_{y,pq}$ tienen a E_y como componente principal del campo eléctrico, y están estrechamente relacionados con los modos TE en una guía de onda plana, pudiéndose considerar como modos *cuasi-TE*.

2.2.4. Tipo de guías de onda.

Existen varios tipos de guías de onda canalizadas que se utilizan en la fotónica de silicio. La guía de onda strip (también conocida como guía de onda de canal), se muestra en la Figura 2.9(a), se utiliza normalmente para el enrutamiento óptico, ya que ofrece radios de curvatura ajustados. La guía de onda RIB (también conocida como guía de onda de cresta), se muestra en la Figura 2.9(b), se utiliza para dispositivos electro-ópticos como los moduladores, ya que permite realizar conexiones eléctricas a la guía de onda. Ambas guías de onda se pueden fabricar para tener una pérdida de propagación de menos de 3 dB/cm.

Se utiliza un recubrimiento de óxido para proteger los dispositivos y permitir la fabricación de interconexiones metálicas sobre las guías de onda. Las guías de onda también pueden fabricarse sin este recubrimiento, por ejemplo, para sensores de campo evanescente en aplicaciones de lab-on-chip [16]

En la Figura 2.9(a1), se observan dos líneas para los modos con polarización TE y dos líneas para los modos con polarización TM, e indican los índices efectivos de cada modo. Para una longitud de onda $\lambda = 1550$ nm, solo los modos por encima de la línea punteada (horizontal) son guiados. Para obtener un único modo con polarización tipo TE a 1550 nm, se requiere una guía de onda tipo strip, con una altura de 220 nm y un ancho de 440 nm, en esas condiciones (< cut-off, línea vertical), la guía de onda soporta un modo cuasi-TE_0 y un modo cuasi-TM_0. Para guías de onda más anchas (> cut-off), aparece un segundo modo cuasi-TE_1, y por encima de 660 nm, aparece un segundo modo cuasi-TM_1.

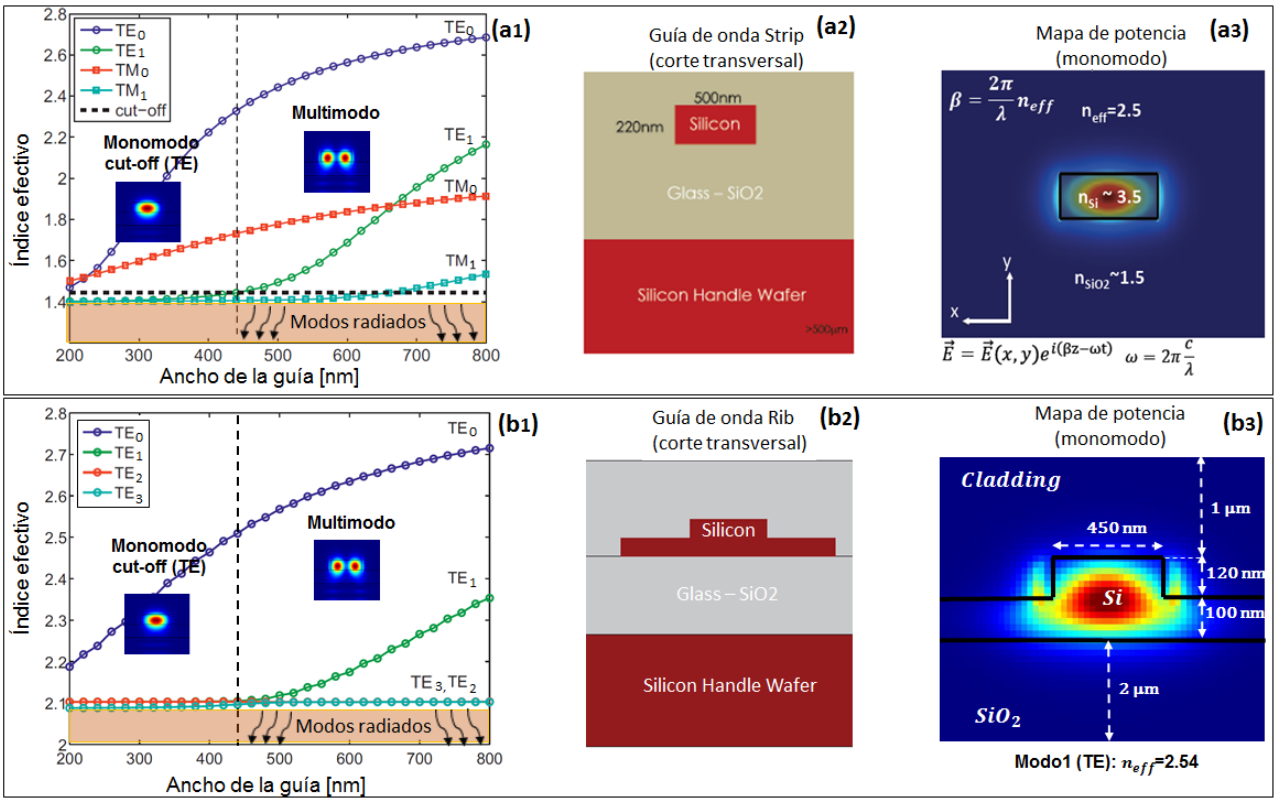


Figura 2.9: Guías de onda comúnmente usadas en fotónica de silicio. Descripción completa de cómo se propaga la luz dentro de una guía de onda. (a) Guía de onda tipo strip, también conocida como guía de onda de canal. (a1): Indice efectivo de los modos guiados vs ancho de la guía. (a2): Corte transversal de la guía de onda strip. (a3): Perfil del modo óptico. (b) Guía de onda tipo RIB, también conocida como guía de onda de cresta. (b1): Indice efectivo de los modos guiados vs ancho de la guía. (b2): Corte transversal de la guía de onda RIB. (b3): Perfil del modo óptico. El índice efectivo es un promedio espacial del índice de refracción.

Cabe destacar que aproximadamente a 680 nm, hay un cruce de modos: es decir, justo por debajo de 680 nm, el modo cuasi-TM_0 es el segundo modo soportado por la guía de onda, mientras que por encima de los 680 nm, el modo cuasi-TE_1 se convierte en el segundo y el modo cuasi-TM_0 se convierte en el tercer modo soportado. La polarización (TE, TM) del modo también se registra; se observa que estas guías de onda no operan en un modo TE puro o TM puro, por lo que la polarización se describe como una fracción de polarización, donde 1 representa un modo TE puro.

En la Figura 2.9(b) observamos una guía de onda tipo RIB, con un espesor de placa (slab) de 100 nm (Figura 2.9(b2)). Los resultados de los índices efectivos después de hacer un barrido en el ancho de la guía, se muestran en la Figura 2.9(b1) para una longitud de onda de 1550 nm, en donde se observan lineas con polarización cuasi-TE (fracción de polarización ≈ 1). Por debajo de 450 nm (cut-off), la guía solo admite un modo cuasi-TE (condición monomodo). Si el ancho de la guía esta por encima de 450 nm, el modo se vuelve multimodal. Este tipo de guía de ondas no admite ningún modo cuasi-TM (fracción de polarización ≈ 0) [17]. Este es el tipo de guía de ondas que se utiliza para dispositivos electro-ópticos como los moduladores de micro-anillo que se verán secciones más adelante.

2.2.5. Resolución numérica de guías de onda.

Para encontrar los modos que satisfacen las condiciones de frontera y poder ser acoplados en una guía de onda, una vez mas aplicamos las ecuaciones de Maxwell con las condiciones de contorno adecuadas [9], limitando el análisis a capas homogéneas, no magnéticas, estacionarias y no conductoras, las ecuaciones de Maxwell se simplifican como:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -i\omega\mu_0\mathbf{H} \tag{2.13}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = i\omega\epsilon_0 n^2\mathbf{E} \tag{2.14}$$

donde n es la distribución del índice de refracción y μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío. En una guía de onda, la distribución de índice es una función distribuida en el plano xy para un dominio acotado y constante a largo del eje de propagación z. Por lo tanto, las ecuaciones 2.13 y 2.14 pueden llevarse a la forma escalar:

$$\nabla^2\mathbf{E} + k_0^2 n^2(x,y)\mathbf{E} = 0 \tag{2.15}$$

donde $k_0 = \omega/c$, siendo ω la frecuencia angular y c la velocidad de la luz. En donde la ec. 2.15 se la denomina *Ecuación de Helmholtz*. A partir de las

condiciones establecidas y la distribución de índice, se proponen como soluciones a las ec. 2.13 y 2.14 una onda monocromática:

$$\mathbf{E} = \mathcal{E}(x, y)e^{i\omega t - \beta z} \tag{2.16}$$

$$\mathbf{H} = \mathcal{H}(x, y)e^{i\omega t - \beta z} \tag{2.17}$$

donde β es la constante de propagación axial, mientras que $\mathcal{E}$ y $\mathcal{H}$ son las distribuciones del campo eléctrico y magnético, respectivamente. Sustituyendo 2.16 en 2.15 se llega a la ecuación que gobierna el comportamiento transversal del campo:

$$\frac{\partial^2 \mathcal{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathcal{E}}{\partial y^2} + \left[k_0^2 n^2 - \beta^2\right] \mathcal{E} = 0 \tag{2.18}$$

como ya sabemos, las componentes tangenciales deben cumplir con la condición de continuidad para todo xy. El análisis de los modos en una guía de onda consiste, entonces, en resolver esta ecuación. Adicionalmente, es evidente que los autovalores están subordinados a la frecuencia o bien a la longitud de onda. Dado que β depende del vector de onda k_0 y la distribución de índice n (ec. 2.8), ambas funciones de la frecuencia, también lo serán los autovalores.

Particularmente, en una guía de onda, son de interés las soluciones estacionarias y cuya distribución de campo tiende a cero en las cercanías (entorno) del núcleo. La ecuación de onda 2.18 puede pensarse como un problema de autovalores, donde $\mathcal{E}$ son las autofunciones y β los autovalores, conocidos como modos. Existe un número infinito de modos que dan solución a esta ecuación. Sin embargo, existe una cantidad finita de ellos que cumplen con las condiciones impuestas, estos son los *modos acoplados*. Reemplazando la constante de propagación por un *índice efectivo*, se determina que los modos acoplados son aquellos autovalores que satisfacen

$$n_s, n_c < n_{\text{eff}} < n_f \tag{2.19}$$

donde el índice efectivo $n_{\text{eff}} = \beta/k_0$. Los índices de refracción del núcleo n_f y del entorno n_c, n_s corresponden a los esquematizados en la Figura 2.8. Los modos acoplados se clasifican según la orientación del campo. Por convención se consideran *modos TE* a las autofunciones cuyo campo eléctrico se encuentra inscripto en el plano transversal xy. Por otro lado, se denominan *modos TM* cuando se tiene en cuenta el campo magnético. Como se vio en párrafos anteriores, para la mayoría de las geometrías no existen los modos puramente TE o TM, sino que se presentan como modos *cuasi-TE* o *cuasi-TM* según la orientación

predominante. Además, las soluciones cuyos autovalores cumplen con $n_{\text{eff}} \leq n_s, n_c$, se conocen como *modos radiados*.

Existen pocas soluciones analíticas para la ecuación escalar 2.18. Los casos más comunes son la fibra óptica y la guía de onda plana, donde el análisis se restringe a una sola dimensión. Sin embargo, las estructuras utilizadas en fotónica integrada suelen ser bidimensionales, lo que impide encontrar una solución analítica exacta al problema. En estos casos, es necesario recurrir a métodos analíticos aproximados o a técnicas numéricas. En los próximos capítulos, se profundizará en los métodos numéricos empleados en esta tesis. A continuación, se resuelven numéricamente dos casos particulares para ilustrar todo lo desarrollado anteriormente.

Se procede a buscar los modos acoplados en una guía de onda típica tipo Strip y tipo RIB, las geometrías de estas guías son como las que se muestran en la Figura 2.9(a2) y (b2). Para ello, se resuelve la ecuación 2.18 de manera numérica. Los resultados de estas simulaciones se presentan en la misma figura 2.9(a1) y (b1), donde se observa la evolución de los autovalores n_{eff}, así como los tipos y la cantidad de modos acoplados a medida que se modifica el ancho w en cada estructura. Tal como se aprecia en la Figura 2.9(a1) y (b1), la guía de onda muestra un comportamiento monomodo dentro de un rango de anchos analizados. La condición a partir de la cual aparecen modos de órdenes superiores se denomina condición de corte o *cutoff*. En los ejemplos propuestos, esta condición se cumple cuando $w = 450\,nm$. Aunque en ambos casos se utiliza una única longitud de onda mientras se modifica el ancho en cada guía, también podría analizarse de manera inversa.

Continuando con el ejemplo anterior, se selecciona un ancho específico en cada guía con el fin de analizar las distribuciones de los campos eléctrico y magnético.

Para ambas guías de onda con un ancho de $w = 450\,nm$, según la Figura 2.9(a1) y (b1), se identifica la existencia de un único modo con un índice efectivo de 2.27 para la guía Strip, y un índice efectivo de 2.3 para la guía RIB. En consecuencia, se determinan las autofunciones correspondientes a estos modos. En la Figura 2.10 y Figura 2.11 se presentan las distribuciones de los campos eléctrico y magnético, así como el perfil de intensidades y la potencia en el plano xy alrededor de la guía Strip (Figura 2.10) y guía RIB (Figura 2.11) respectivamente.

En particular, de ambas Figuras se observa que el campo eléctrico predominante está dirigido en la dirección x, aunque existe una pequeña componente en el eje y, lo que confirma la presencia de un modo cuasi-TE. Por otro lado, en la Figura 2.10(c3) y Figura 2.11, se puede apreciar la distribución de la potencia acoplada. Debido a la asimetría en la distribución del índice, la potencia varía

dependiendo de la región para ambos tipos de guías.

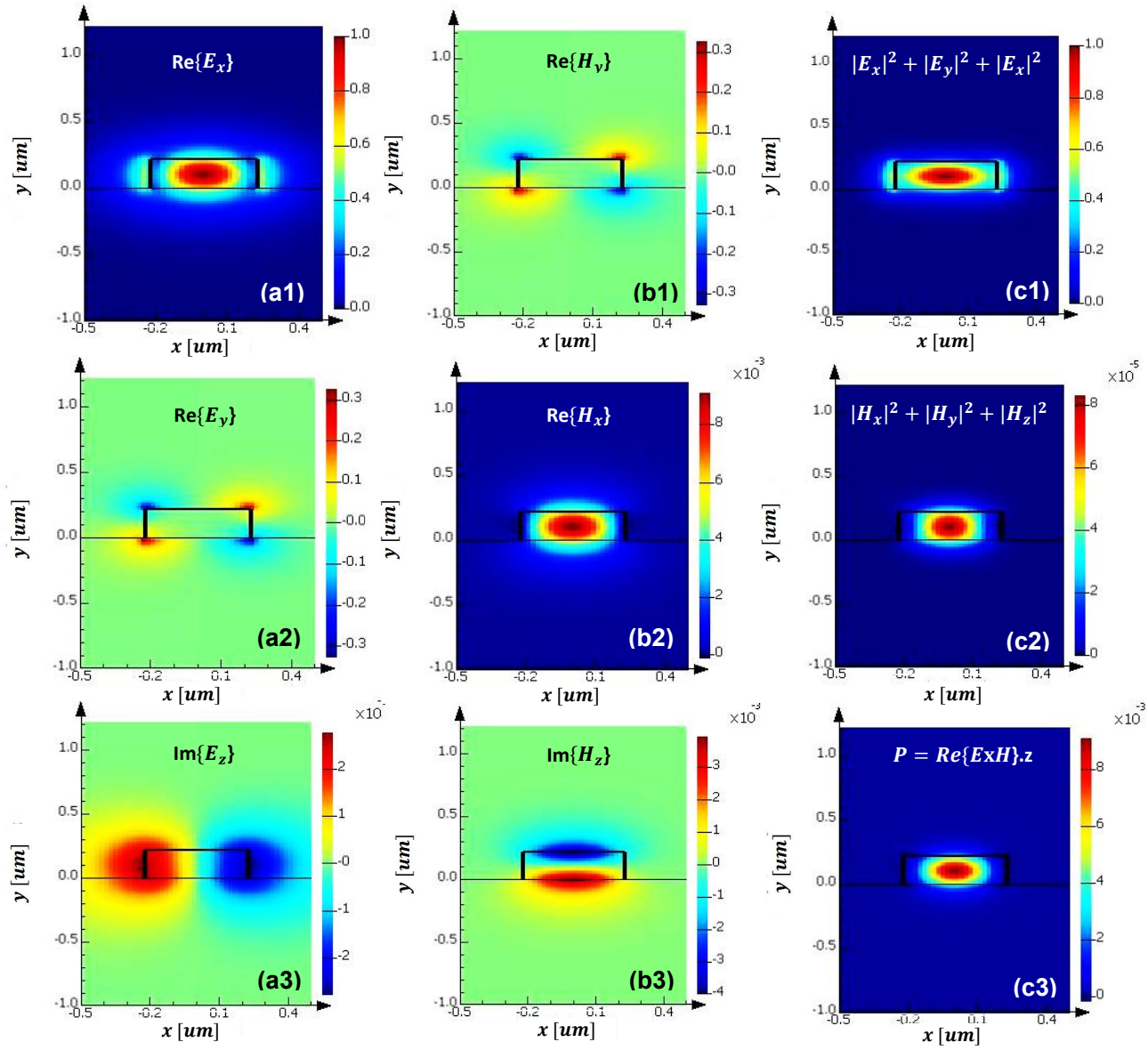


Figura 2.10: Autofunciones que dan solución a la ecuación 2.8 para una estructura Strip como la esquematizada la Figura 2.9(a2). Los parámetros utilizados son: h = 220 nm, w = 450 nm y longitud de onda 1.55 μm. (a1), (a2) y (a3): Distribución de campo eléctrico. (b1), (b2) y (b3): Distribución de campo magnético. (c1) y (c2): Distribución de intensidades. (c3) Distribución de potencia.

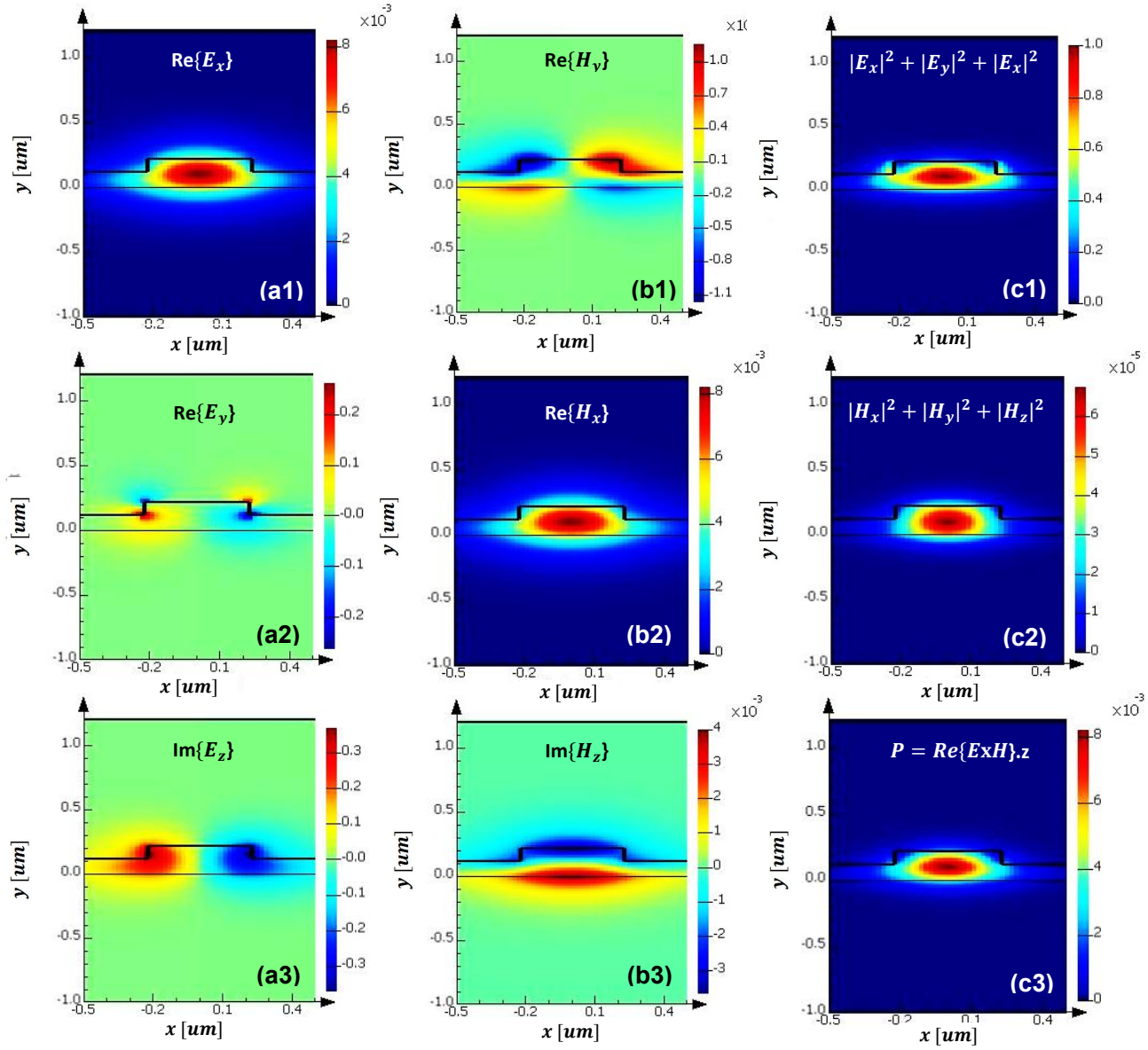


Figura 2.11: Autofunciones que dan solución a la ecuación 2.8 para una estructura Rib como la esquematizada la Figura 2.9(b2). Los parámetros utilizados son: h = 220 nm, w = 450 nm, slab = 100 nm y longitud de onda 1.55 μm. (a1), (a2) y (a3): Distribución de campo eléctrico. (b1), (b2) y (b3): Distribución de campo magnético. (c1) y (c2): Distribución de intensidades. (c3) Distribución de potencia.

2.3. Análisis espectroscópico del infrarrojo cercano NIRS

La espectroscopia de infrarrojo cercano (Near Infrared Spectroscopy, NIRS) es una técnica simple, rápida y no destructiva que proporciona análisis multiconstituyente en prácticamente cualquier matriz con niveles de exactitud y precisión comparables a los métodos de referencia primarios. Como otro gran beneficio, los análisis de infrarrojo cercano (NIR) no requieren preparación de muestras ni manipulación con productos químicos, disolventes o reactivos peligrosos: NIR pertenece, por tanto, a las metodologías sin reactivos, por lo que es una contribución analítica ejemplar para la protección del medio ambiente al intento de química verde de la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency's, EPA). Los espectros NIR registrados contienen una variedad de información química y física (por ejemplo, tamaño de partícula) sobre la muestra y sus constituyentes. La identificación NIR se pueden realizar comparando un espectro de muestra con espectros de referencia de materiales conocidos.

El análisis NIR fue utilizado por primera vez por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) a mediados de la década de 1960 para detectar las cualidades internas de los cultivos de manzanas arruinados por una condición devastadora llamada "núcleo de agua". Esta aplicación original de la tecnología NIR podría incluso predecir los niveles de madurez de la fruta y el contenido de azúcar, y proporcionar medidas indirectas de sabor y textura. Desde estos inicios, la espectroscopia NIR se lanzó como un método popular para realizar análisis rápidos y no destructivos en una amplia variedad de matrices en las industrias agrícola y alimentaria.

En las industrias farmacéutica y química, el análisis de infrarrojo cercano (NIR) se ha utilizado con éxito durante más de 25 años. Inicialmente, se empleó para probar materias primas, pero recientemente se ha enfocado en analizar formulaciones químicas para controlar la calidad del producto y monitorear procesos de fabricación. La espectroscopía NIR, junto con técnicas de regresión estadística, proporciona información química casi en tiempo real, ayudando en el control de procesos de producción, recuperación de solventes y operaciones como secado, mezcla y extrusión. Para garantizar que se implemente la estrategia de análisis más adecuada y se desarrollen métodos NIR sólidos, se deben considerar las características ópticas de la muestra, la sensibilidad y selectividad del analito y los requisitos de producción y control.

2.3.1. Teoría de la espectroscopia vibracional

Términos como 'espectroscopia de vibración armónica' y 'espectroscopia de vibración anarmónica' muestran que la teoría de la banda NIR es bastante compleja. Aunque esta tesis no pretende proporcionar una visión general de los fundamentos teóricos de la espectroscopia vibracional, es necesario explorar algunos principios básicos que faciliten la interpretación de los espectros.

Interacción de la luz y la materia física

La espectroscopia utiliza luz (radiación electromagnética) para analizar materiales describiendo la transferencia de energía entre la luz y la materia. La energía de un solo fotón (la partícula de luz) se define como:

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} = h \cdot c \cdot \tilde{\nu} \tag{2.20}$$

h - Constante de Planck en $\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{kg/s}$
ν - Frecuencia de la luz en s^{-1}
c - Velocidad de la luz en $\mathrm{m/s}$
λ - Longitud de onda de la luz en m
$\tilde{\nu}$ - Número de onda de la luz m^{-1}

$$\text{con } \tilde{\nu} = \tfrac{1}{\lambda};$$
$$\tilde{\nu}\,[\mathrm{cm}^{-1}] = \tfrac{10^7}{\lambda\,[\mathrm{nm}]}$$

Generalmente, los números de onda (wavenumbers) se indican en cm^{-1}. Para convertir la longitud de onda (wavelength) en números de onda, el recíproco de la longitud de onda en nm se multiplica por 10^7. La ec. 2.20 muestra que cuanto más corta es la longitud de onda, mayor es el número de onda (wavenumber) y mayor la energía del fotón.

El espectro electromagnético se divide en varias regiones. Cada región representa un tipo específico de transición molecular o atómica y, por tanto, una técnica espectroscópica específica. Los rayos gamma y los rayos X tienen longitudes de onda de sólo unos pocos nm y son muy dañinos porque rompen enlaces químicos y moléculas iónicas. La radiación ultravioleta cubre la región de 190 a 350 nm y la radiación visible (VIS), la región de 350 a 780 nm. La absorción de fotones en el rango UV/VIS transfiere electrones desde orbitales moleculares de baja energía a orbitales de moléculas de alta energía y el regreso al estado fundamental se

produce fácilmente a través de la fluorescencia. La radiación denominada infrarrojo cercano (NIR), define el rango entre 780 y 2500 nm. Las moléculas pueden absorber luz infrarroja sin reemitirla posteriormente excitando ciertas frecuencias vibratorias. La muestra absorbe las frecuencias de la luz policromática que corresponden a sus transiciones vibracionales moleculares.

Oscilador armónico

Estas vibraciones moleculares se pueden describir utilizando el modelo de física clásica del oscilador diatómico armónico como el sistema de vibración más simple. Dos masas vibrantes conectadas con un resorte con una fuerza constante determinada provocan cambios en la distancia internuclear. Combinando la ley de Hooke con la ley de Newton, la frecuencia vibratoria corresponde a:

$$v_{vib} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{\mu}} \tag{2.21}$$

v – frecuencia de enlace de la banda de absorción
k – constante de fuerza del enlace
μ – masa reducida de los átomos unidos

La frecuencia de la vibración y, por tanto, la energía, dependen, entre otras cosas, de la fuerza de la unión. Estas frecuencias vibratorias son la clave que contiene información sobre la estructura del compuesto investigado. Esta es la base para la aplicación de la espectroscopia vibracional.

Según la ley de Hooke, la energía potencial V del oscilador armónico es una función cuadrática del desplazamiento de los átomos en vibración. La función parabólica es simétrica con respecto a la longitud del enlace de equilibrio r_e

$$V = \frac{1}{2}k\left(r - r_e\right)^2 = \frac{1}{2}kx^2 \tag{2.22}$$

V – energía potencial
r – distancia internuclear
μ – distancia internuclear en equilibrio
x – desplazamiento de átomos vibratorios

Las consideraciones de mecánica cuántica utilizando la ecuación de Schrödinger muestran que la energía vibratoria del oscilador armónico no tiene un continuo para los niveles de energía vibratoria, sino sólo ciertos niveles de energía discretos.

$$E_{vib} = hv\left(\mathrm{v} + \frac{1}{2}\right) \tag{2.23}$$

$$v - \text{número cuántico vibracional } (0,\ 1,\ 2,\ldots)$$

El número cuántico vibracional sólo puede tener valores enteros 0, 1, 2, 3... Con la ecuación 2.21 la energía vibratoria es:

$$E_{vib} = \left(\mathrm{v} + \frac{1}{2}\right)\frac{h}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{\mu}} \tag{2.24}$$

Según la ecuación 2.24 sólo se permiten transiciones entre niveles de energía vecinos y equidistantes en el oscilador armónico.

La distribución de las moléculas entre los niveles vibratorios permitidos sigue la distribución de Boltzmann. A temperatura ambiente, la mayoría de las moléculas residen en el nivel vibratorio más bajo $\mathrm{v} = 0$. Por lo tanto, la primera transición permitida al nivel de energía $\mathrm{v} = 1$, también llamada transición fundamental, domina el espectro. Las demás transiciones permitidas se derivan de niveles excitados por vibraciones y las bandas asociadas son mucho más débiles.

Entonces, una pre condición para la absorción de un fotón de luz, es que la frecuencia del fotón de luz sea igual a la diferencia de energía entre dos estados de vibración del enlace. Pero eso no es todo lo que se necesita para absorber energía.

Absorción de energía según la teoría de la resonancia.

Según la teoría de la resonancia, se debe encontrar una manera de transferir con éxito la energía a la molécula (por ejemplo, ejerciendo contacto físico o, en el caso de materiales magnéticos, aplicando un campo magnético). En el caso de las vibraciones moleculares, esta transferencia se produce a través de la polaridad molecular, es decir, la interacción de la radiación infrarroja con una molécula vibrante sólo se produce cuando la vibración va acompañada de un cambio del momento dipolar μ.

$$\frac{\delta\mu}{\vartheta x} \neq 0 \tag{2.25}$$

El grado del cambio en el momento dipolar dentro de la transición vibratoria, determina en gran medida la intensidad de la absorción de luz. Según la ecuación 2.25, sólo las moléculas diatómicas heteronucleares muestran transiciones (vibracional-espectrales) entre los fotones de la luz y las vibraciones de las moléculas. El átomo de hidrógeno es el átomo más ligero. Por lo tanto, los enlaces con hidrógeno exhiben las mayores vibraciones (C – H, N – H, O – H y S – H). La mayoría de las moléculas tienen más de dos átomos que pueden realizar más de un tipo de vibración por enlace (estiramiento, flexión). Además, no todos los enlaces vibran independientemente unos de otros; muchas vibraciones reales están acopladas.

Oscilador anarmónico

La curva de energía potencial del oscilador armónico (Ec. 2.22) es parabólica y sólo son posibles transiciones entre niveles de energía consecutivos que provoquen adicionalmente un cambio en el momento dipolar. Según este modelo, se pueden almacenar infinitas energías en la molécula sin que se rompa el enlace. Sin embargo, la experiencia enseña que todas las moléculas se disocian cuando se le suministra la energía suficiente al sistema y se extiende el enlace vibratorio. Además, cuando los átomos se presionan entre sí, se observan fuertes fuerzas repulsivas. Debido a esta llamada anarmonicidad mecánica (disociación de enlaces y repulsión de Coulomb), es necesario modificar el modelo clásico de bola y resorte. Por lo tanto, la ecuación 2.22, que describe la energía potencial como una función cuadrática del desplazamiento, se amplía agregando términos de desplazamiento de orden superior:

$$V = \frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}k_a x^3 + k_b x^3 + ... \tag{2.26}$$

$$\text{con} k_a, k_b \ll k$$

Con las correcciones en la Ec. 2.26, la ecuación de Schrödinger proporciona el siguiente término para la energía vibracional de la molécula

$$E_{vib} = h\nu\left(\mathrm{v} + \frac{1}{2}\right) - y\left(\mathrm{v} + \frac{1}{2}\right)^2 \tag{2.27}$$

$$y - \text{constante de anarmonicidad}$$

La anarmonicidad ahora permite transiciones entre estados de energía no contiguos donde Δ v $= \pm$ 2, 3,...

Entonces, los niveles de energía vibratoria ya no son equidistantes y las diferencias de energía disminuyen al aumentar el número cuántico. En lugar de la forma parabólica, la curva de energía potencial se representa mediante una función Morse asimétrica. Además de esta anarmonicidad mecánica, cabe mencionar la anarmonicidad electrónica. Generalmente es mucho más pequeño que la anarmonicidad mecánica y surge de la relación no lineal entre el momento dipolar y el desplazamiento atómico.

Implicaciones para la espectroscopia de infrarrojo cercano, NIRS

En resumen, la aparición y las propiedades espectrales de las bandas de absorción NIR se deben, además del cambio del momento dipolar, a la gran anarmonicidad mecánica de los átomos en vibración. Esto se refleja en:

- transiciones de armónicos que corresponden a números cuánticos mayores que uno y que aparecen como múltiplos de la frecuencia vibracional fundamental. Las transiciones de armónicos aparecen entre 780 y 2000 nm. Los primeros y armónicos superiores, son mucho menos probables que la frecuencia vibratoria fundamental. Esa es la razón por la que las bandas son más débiles.
- combinación de modos que aparecen en moléculas poliatómicas, donde interactúan múltiples modos de vibración. Son la suma de múltiplos de cada frecuencia que interactúa. Sus bandas de absorción emergen entre 1900 y 2500 nm.
- Los estados de energía no equidistantes de una vibración. Esto significa que las transiciones permitidas se vuelven de menor energía.

2.3.2. Region espectral NIR

La región NIR del espectro electromagnético se extiende desde el final de la región espectral visible (700 nm o 14285 cm^{-1}), hasta el comienzo de la región espectral infrarroja (IR) fundamental (2500 nm o 4000 cm^{-1}). Las bandas de absorción más prominentes que ocurren en la región NIR están relacionadas con las bandas armónicas y combinadas de las vibraciones moleculares fundamentales de los grupos funcionales C – H, N – H, O – H y S – H, observadas en la región espectral del infrarrojo medio (MIR) Figura 1. Por lo tanto, la mayoría de las especies químicas y bioquímicas exhiben bandas de absorción únicas en la región espectral NIR que pueden usarse con fines tanto cualitativos como cuantitativos.

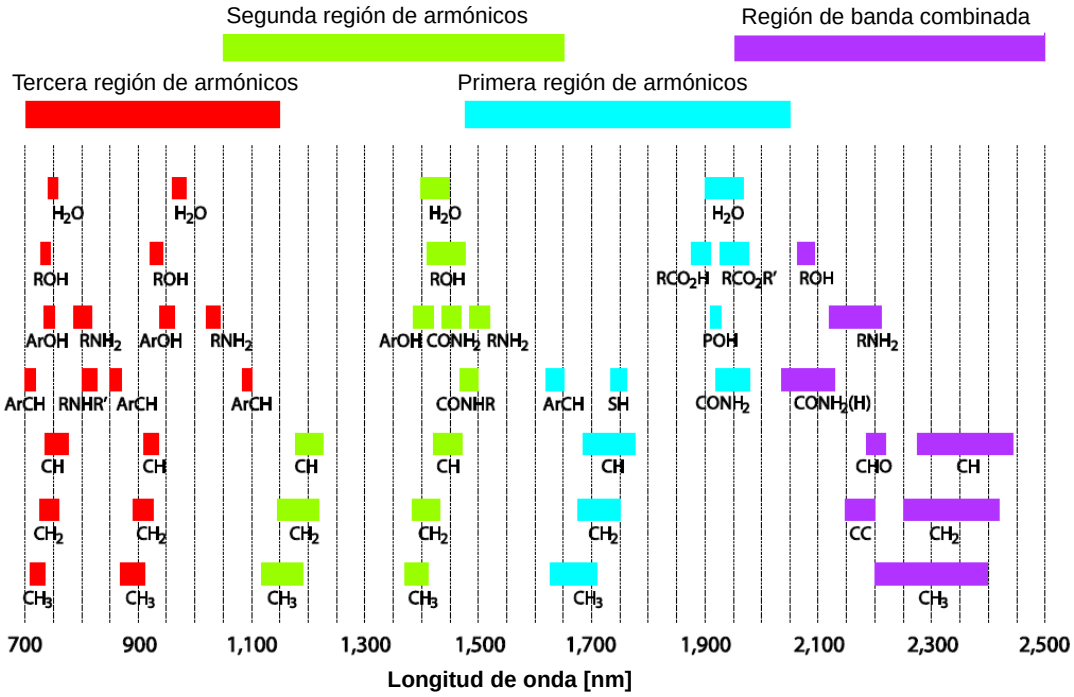


Figura 2.12: Principales bandas analíticas y posiciones de picos relativos para absorciones prominentes en el infrarrojo cercano. La mayoría de los productos químicos y biológicos exhiben absorciones únicas que pueden usarse para análisis cualitativos y cuantitativos.

Longitud de onda [nm]	**Número de onda [cm^{-1}]**	**Asignación**
2200–2450	4545–4082	Combinación de estiramiento C–H
2000–2200	5000–4545	Combinación de estiramiento N–H; Combinación de estiramiento O–H
1730–1760	5780–5682	Primer armónica de estiramiento S–H
1650–1800	6061–5556	Primer armónica de estiramiento C–H
1400–1500	7143–6667	Primer armónica de estiramiento N–H; Primera armónica de estiramiento O–H
1300–1420	7692–7042	Combinación de estiramiento C–H
1100–1225	9091–8163	segunda armónica de estiramiento C–H
950–1100	10526–9091	segunda armónica de estiramiento N–H; segunda armónica de estiramiento O–H
850–950	11765–10526	tercera armónica de estiramiento C–H
775–850	12903–11765	tercera armónica de estiramiento N–H

Tabla 2.1: Tabla de asignación de longitudes de onda y números de onda. Tabla tomada de [18]

Las bandas de absorción NIR suelen ser entre 10 y 100 veces más débiles que la correspondiente banda de absorción fundamental del IR medio (MIR). Esta naturaleza débil de las absorciones NIR es en realidad una ventaja analítica, ya que permite el análisis directo de matrices fuertemente absorbentes y altamente dispersantes de la luz, como lodos, suspensiones, pastas y polvos. Las bandas de absorción NIR también son muy amplias (anchos de banda de 50 a 100 nm) y muy superpuestas. Las bandas de absorción NIR que ocurren en longitudes de onda más largas son más fuertes, más nítidas y mejor resueltas que sus correspondientes

bandas de armónicos más altos, que ocurren en longitudes de onda más cortas, (Figura 2.13).

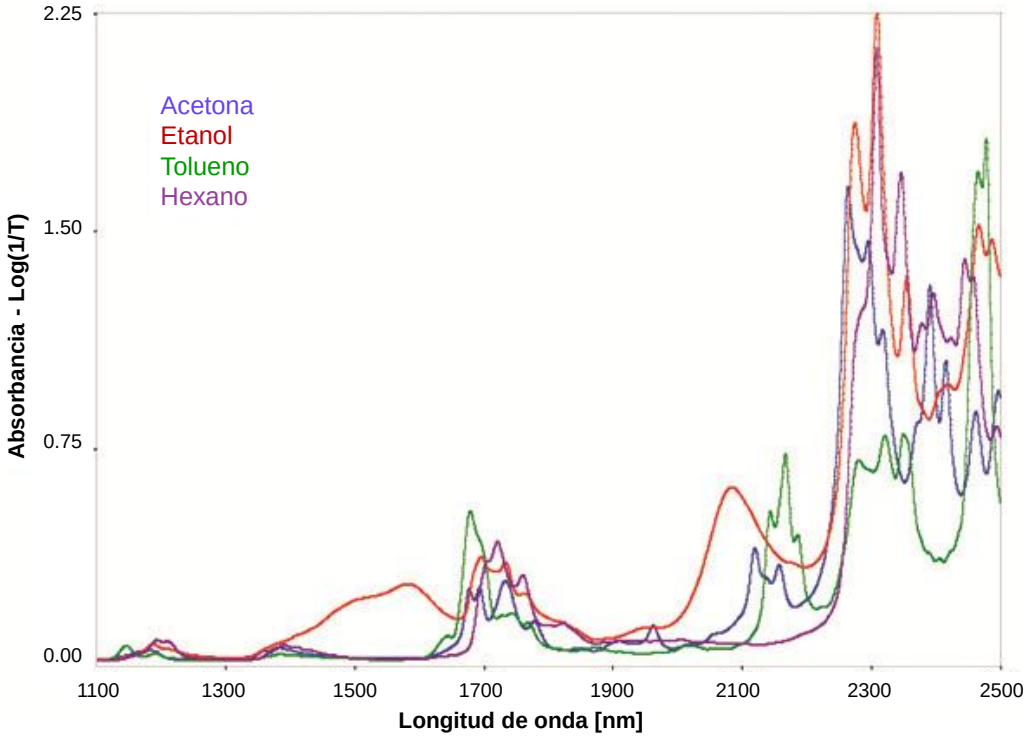


Figura 2.13: Espectros de transmitancia difusa (log(1/T)) en la banda NIR (1100–2500 nm) de disolventes típicos.

Referencias

[1] P. Munoz. «Photonic integration in the palm of your hand: Generic technology and multi-project wafers, technical roadblocks, challenges and evolution». En: *Proceedings of the 2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. Los Angeles, CA, USA, 19-23 de mar. de 2017, págs. 1-3.

[2] D. J. Blumenthal et al. «Silicon Nitride in Silicon Photonics». En: *Proceedings of the IEEE* 106.12 (2018), págs. 2209-2231. DOI: 10.1109/JPROC.2018.2861576.

[3] Kevin Luke et al. «Broadband Mid-Infrared Frequency Comb Generation in a Si_3N_4 Microresonator». En: *CLEO: 2015* (2015).

[4] Amir Arbabi y Lynford L. Goddard. «Measurements of the refractive indices and thermo-optic coefficients of Si_3N_4 and SiO_x using microring resonances». En: *Optics Letters* 38.19 (2013), pág. 3878.

[5] W. Bogaerts y S.K. Selvaraja. «Silicon-on-insulator (SOI) technology for photonic integrated circuits (PICs)». En: *Silicon-On-Insulator (SOI) Technology*. Ed. por Oleg Kononchuk y Bich-Yen Nguyen. Woodhead Publishing, 2014, págs. 395-434.

[6] Kurt Oughstun y Natalie Cartwright. «On the Lorentz-Lorenz formula and the Lorentz model of dielectric dispersion: addendum». En: *Optics Express* 11.21 (2003), pág. 2791.

[7] G. Cocorullo e I. Rendina. «Thermo-optical modulation at 1.5 μ m in silicon etalon». En: *Electronics Letters* 28.1 (1992), págs. 83-85.

[8] D. B. Anderson. «Application of semiconductor technology to coherent optical transducers and spatial filters». En: *Optical and Electro-Optical Information Processing*. Ed. por J. Tippett. Cambridge: M.I.T. Press, 1965, págs. 221-234.

[9] John David Jackson. *Classical Electrodynamics*. 3rd. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998.

[10] W. Lukosz. «Integrated optical chemical and direct biochemical sensors». En: *Sensors and Actuators B: Chemical* 29 (1995), págs. 37-50. DOI: 10.1016/0925-4005(95)85005-4.

[11] B. E. A. Saleh y M. C. Teich. «Guided-wave optics». En: *Fundamentals of Photonics*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007, págs. 289-324.

[12] P. K. Tien. «Integrated optics and new wave phenomena». En: *Reviews of Modern Physics* 49.2 (1977), págs. 361-420. DOI: 10.1103/RevModPhys.49.361.

[13] M. K. Cottier. «Advanced Label-free Biochemical Sensors Based on Integrated Optical Waveguide Gratings». Tesis doct. Université de Neuchâtel, Faculté des Sciences, 2004.

[14] N. Kovács et al. «Optical anisotropy of flagellin layers: in situ and label-free measurement of adsorbed protein orientation using OWLS». En: *Analytical Chemistry* 85.11 (2013), págs. 5382-5389. DOI: 10.1021/ac400441h.

[15] G. Lifante. *Integrated Photonics: Fundamentals*. London: John Wiley y Sons, 2003.

[16] Muzammil Iqbal, Martin A. Gleeson, Bradley Spaugh et al. «Label-free biosensor arrays based on silicon ring resonators and high-speed optical scanning instrumentation». En: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 16.3 (2010). Cited on p. 52, págs. 654-661.

[17] Lukas Chrostowski y Michael Hochberg. *Silicon Photonics Design: From Devices to Systems*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2015.

[18] B. H. Stuart. *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*. John Wiley & Sons, 2004.

Parte II

Técnicas Experimentales y Métodos Numéricos.

Capítulo 3

Métodos Numéricos y modelado.

Índice

3.1. Diseño de circuitos ópticos para la fabricación de máscaras. 52
3.1.1. Flujos de diseño 52
3.2. Métodos de modelado y diseño. 56
3.2.1. Solucionador de modos de guía de onda óptica 56
3.2.2. Propagación de ondas 57
3.2.3. Método de expansión de auto-modos (EME) 59
3.2.4. Método de propagación del haz (BPM) 60
3.2.5. Modelado de circuitos ópticos. 61
3.3. Diseño de guías de onda. 62
3.3.1. Modelado numérico de guías de ondas. 63
3.3.2. Método del Índice Efectivo 2D. 64
3.4. Dispositivos Fotónicos Integrados (PICs) 65
3.4.1. Linear tapers 65
3.4.2. Acopladores Direccionales. 66
3.4.3. Divisor de potencia Y branch 70
3.4.4. Interferómetro Multimodal - MMI. 73
3.4.5. Anillo resonador óptico. 77
3.4.6. Redes de Bragg. 83
3.4.7. *Arrayed Waveguide Gratings* - AWG 88

En esta sección vamos a introducir la metodología empleada en el desarrollo de dispositivos fotónicos integrados, la misma se basa en 3 etapas: diseño, simulación y fabricación. En la etapa de diseño se realiza un modelado físico del dispositivo, y para verificar el funcionamiento esperado se ejecutan sucesivas simulaciones numéricas seguido de un análisis del rendimiento. Luego, mediante técnicas CMOS se procede a fabricar los dispositivos.

3.1. Diseño de circuitos ópticos para la fabricación de máscaras.

En la fotónica integrada, el diseño juega un rol fundamental. Empieza con una idea que define los objetivos y requisitos del dispositivo final. Una vez que se ha establecido la respuesta deseada del circuito fotónico y se comprenden las funciones de los componentes clave, se plantea una solución posible para abordar el problema. Esto da inicio a un proceso iterativo en el que se afinan y ajustan los detalles del diseño hasta alcanzar una solución óptima.

Los circuitos fotónicos integrados comparten muchas características de los circuitos integrados electrónicos. Se definen mediante procesos planares en obleas semiconductoras. La funcionalidad se puede describir y modelar como un circuito, con señales que se propagan entre los bloques de construcción funcionales. Al igual que ocurre con la electrónica, la funcionalidad de un circuito fotónico no proviene de un solo elemento, sino de la conectividad entre muchos bloques de construcción y subcircuitos funcionales. El diseño de los chips finalmente se traduce en un conjunto de "mask layers" geométricos con los patrones para cada paso de procesamiento planar. Los primeros circuitos integrados fotónicos se definieron como un solo dispositivo y generalmente se simulaban utilizando técnicas de simulación electromagnética directa (pero aproximada), como los métodos de propagación de haz (BPM) [1].

Dada la misma base tecnológica, no sorprende que el ecosistema de la fotónica del silicio esté evolucionando en la misma línea que la electrónica, donde un pequeño número de fábricas ("foundries"), fabrican los chips para una comunidad mucho más grande de diseñadores [2]. En este modelo "sin fábrica", los diseñadores no pueden dirigir las mejoras del proceso de fabricación, por lo que deben tener suficiente información sobre el proceso y de los componentes básicos calificados para diseñar circuitos de manera confiable. Para ello, las fábricas suministran kits de diseño de procesos (PDK) con detalles sobre el proceso de fabricación juntos a los bloques de construcción, que contienen el diseño geométrico y en algunos casos el comportamiento de los modelos.

3.1.1. Flujos de diseño

El propósito de un flujo de diseño es traducir una idea funcional en un chip funcional (es decir, el diseño), utilizando un método reproducible (el flujo). El objetivo final de obtener un chip que funcione, es importante. Si bien el diseño de componentes fotónicos simples se puede realizar de manera intuitiva, un flujo re-

producible, respaldado por herramientas de software eficientes, es importante para garantizar que se fabriquen chips y circuitos más complejos con un rendimiento suficiente.

Podemos dividir el flujo de diseño en los siguientes pasos:

- Diseño conceptual: la idea funcional se transforma en un esquema lógico compuesto por bloques de construcción funcionales o subcircuitos jerárquicos. Se pueden explorar diversas arquitecturas o topologías de circuitos, junto con distintas opciones de bloques de construcción.
- Simulación de circuito: Se simula el circuito lógico y sus parámetros están optimizados para que funcione según lo previsto. Esto también puede incluir un análisis de rendimiento mediante la introducción de variabilidad en los parámetros del circuito.
- Diseño del circuito: el circuito lógico se convierte en una representación del diseño de máscara que se puede utilizar para la fabricación. Esto finalmente da como resultado una gran cantidad de polígonos en diferentes capas de máscara (*mask layers*).
- Diseño de chip global: los circuitos lógicos se ensamblan y conectan a una red de distribución de suministro de energía, E/S eléctricas.
- Verificación: El diseño se verifica contra errores, asegurándose de que sea compatible con el proceso de fabricación y se realizan simulaciones posteriores al diseño para garantizar que el diseño realizará la función prevista.
- Grabación y fabricación: el archivo de diseño se somete a una serie de pasos de posprocesamiento para convertirlo en los patrones de escritura reales y se fabrica el chip.
- Testing and Packaging: el chip fabricado se empaqueta y se prueba, y los resultados se comparan con el diseño original. Si es necesario, la información del diseño se actualizará para mejorar la próxima generación de diseños.

Identificar y separar claramente estos pasos y niveles de abstracción en el diseño, es esencial para escalar los circuitos. Esto es una lección que se ha aprendido de la electrónica [3].

Un kit de diseño de procesos (PDK), en general, es un paquete de información para que un diseñador cree un diseño de chip que pueda fabricarse en una "foundrie"[4]. Como se ilustra en la Figura 3.1, el PDK es la principal interfaz

entre la fábrica y el diseñador. Por lo tanto, un PDK actúa como un puente entre el nivel de abstracción requerido por el diseñador del circuito y el diseñador del dispositivo fotónico. Además, protege al diseñador de circuitos, de los detalles del proceso de fabricación y reduce la necesidad de optimizar la geometría de cada dispositivo individualmente.

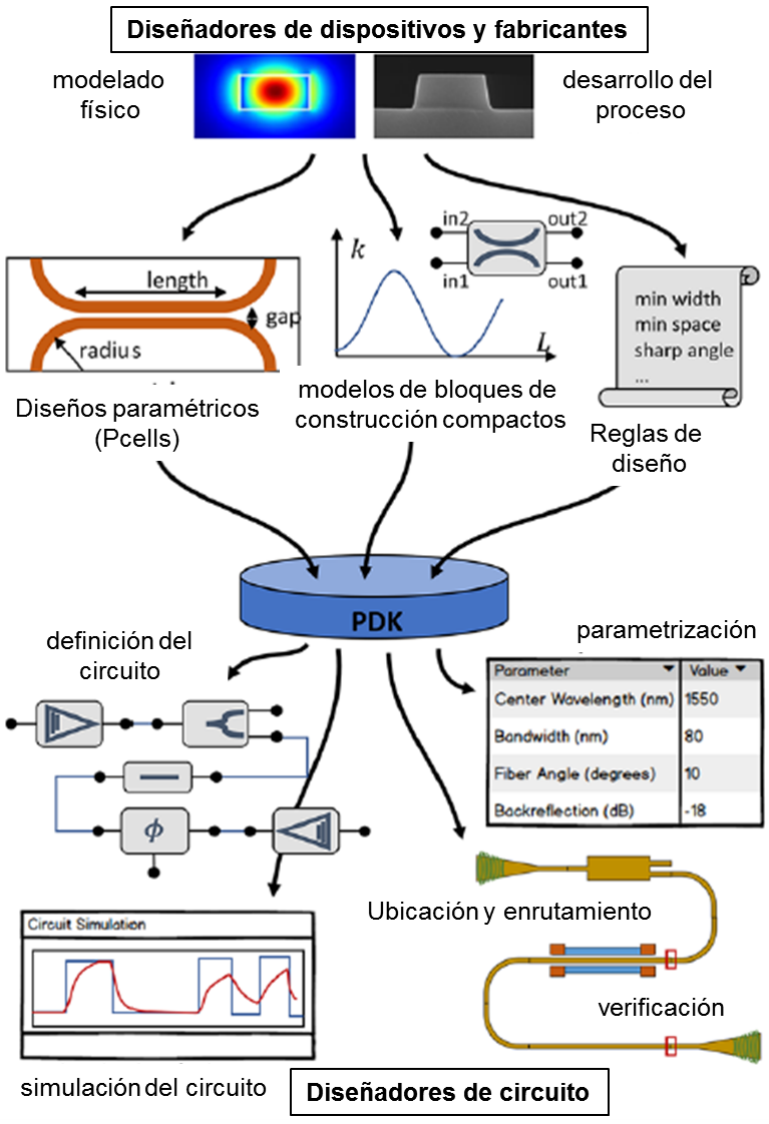


Figura 3.1: Un kit de diseño de procesos (PDK) separa a los diseñadores de componentes y fábricas de los diseñadores de circuitos. Contiene las descripciones de los componentes básicos (diseño y modelos de circuito) y las reglas de diseño del proceso de fabricación. Con base en esta información, un diseñador de circuitos no debería tener la necesidad de realizar un modelado físico de los bloques de construcción (paramétricos). Adaptado de [5]

Para el diseño de los componentes, es esencial emplear herramientas computacionales que faciliten el modelado. En términos generales, el proceso de modelado y simulación puede clasificarse según el problema a abordar. En este contexto,

el caso más sencillo es el análisis de modos en una guía. Otro tipo de análisis implica el estudio de la propagación de ondas, una fase que demanda altos recursos computacionales. Finalmente, se utilizan modelos compactos para simular circuitos o sistemas fotónicos. Además, es común complementar las simulaciones con otros dominios físicos, como el modelado electrónico, opto-electrónico o térmico del circuito. Los programas de modelado aplican diversos métodos de cálculo numérico, los cuales proporcionan mecanismos para resolver las ecuaciones que describen el comportamiento de las estructuras fotónicas. Por lo tanto, es crucial entender en qué situaciones y bajo qué condiciones deben emplearse estas herramientas. A continuación, se mencionan algunas de las aplicaciones comerciales más frecuentemente empleadas en la industria de la fotónica integrada:

- Lumerical (parte de Ansys): ofrece un conjunto de herramientas para la simulación de dispositivos fotónicos, como FDTD Solutions, MODE Solutions, DEVICE, e INTERCONNECT [6].
- RSoft Photonic Device Tools (parte de Synopsys): proporciona herramientas para el diseño y simulación de dispositivos fotónicos, incluyendo BeamPROP, FullWAVE, y DiffractMOD [7].
- Luceda Photonics: Luceda Photonics ofrece herramientas de software para el diseño y la simulación de circuitos y dispositivos fotónicos integrados. Su plataforma principal es IPKISS, que proporciona un entorno de diseño integrado en base a Python para la creación de circuitos fotónicos, incluyendo modelado, simulación y verificación [8].
- COMSOL Multiphysics: ofrece un entorno de simulación multipropósito que incluye módulos para la simulación óptica y fotónica [9].
- OptiFDTD (Optiwave): es una herramienta para el análisis y diseño de dispositivos fotónicos mediante la técnica de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) [10].
- Photon Design: ofrece herramientas para la simulación de dispositivos fotónicos, como FIMMPROP, CrystalWave, y OmniSim [11].

A continuación se presentan de manera resumida los diversos enfoques y categorías de modelado abordados en este trabajo, especialmente aquellos relacionados con el ámbito óptico.

3.2. Métodos de modelado y diseño.

3.2.1. Solucionador de modos de guía de onda óptica

Un solucionador de auto-modos (*eigenmode solver*), resuelve modos ópticos en una sección transversal de una geometría de guías de onda arbitraria (o una geometría 3D) a una frecuencia particular. Un modo de guía de ondas es una distribución de campo transversal que se propaga a lo largo de la guía de onda sin cambiar de forma; la solución es invariante en el tiempo. En la Figura 2.9 (a3 y b3), se muestra el perfil de un modo como ejemplo en una guía de onda strip y rib respectivamente.

Los solucionadores de auto-modos, buscan las formas de onda específicas que pueden existir en una estructura y que oscilan sinusoidalmente con el tiempo. Lo hacen resolviendo las ecuaciones de Helmholtz para una frecuencia específica en lugar de hacerlo directamente en función del tiempo. Esto permite analizar cómo las ondas electromagnéticas se propagan y se comportan en una estructura para una frecuencia particular. Debido a que proporcionan una solución para una única frecuencia óptica, se necesitan numerosas simulaciones para obtener los barridos de longitud de onda necesarios para estudiar la dispersión en las guías de onda. Hay varios enfoques para resolver este problema, incluyendo el método de elementos finitos (FEM), el algoritmo de diferencias finitas (FD), y diversas aproximaciones como el método del índice efectivo (EIM). En el caso de guías de onda altamente confinadas en circuitos integrados fotónicos de silicio, con un alto contraste de índices de refracción, es crucial usar técnicas totalmente vectoriales para lograr resultados precisos. Esto está disponible tanto en métodos de elementos finitos[12] como en métodos diferencias finitas [13]. Los "solvers"de *elementos finitos* tienen la ventaja de que la malla no está estructurada, por lo que son particularmente útiles para estudiar estructuras no rectangulares, como formas redondeadas, cónicas o esféricas, donde se desea una malla más flexible. El enfoque por *elementos finitos* también es útil para estructuras tridimensionales, como para encontrar el perfil del modo en un resonador óptico. Por otro lado, la técnica de *diferencias finitas* es particularmente adecuada para estructuras de contraste de alto índice y tiene la ventaja de que la malla es compatible con la técnica de *diferencias finitas en el dominio del tiempo* (FDTD) que se describe en la sección 3.2.2.

Las herramientas numéricas que ofrecen esta capacidad incluyen implementaciones de código abierto como WGMODES en MATLAB [14] y herramientas comerciales que incluyen: Lumerical MODE Solutions, COMSOL Multiphysics,

Photon Design FIMMWAVE, Synopsys RSoft FemSIM y otros. Los cálculos de *auto-modos* también son útiles para determinar las estructuras de bandas en estructuras periódicas como cristales fotónicos y redes de Bragg. En este trabajo utilizamos Lumerical MODE Solutions para el cálculo de modos. Lumerical MODE utiliza un algoritmo de diferencias finitas con técnicas de matrices dispersas.

Brevemente, los pasos de la simulación son: definir la estructura de la guía de onda, incluida la guía de ondas y el *cladding*; especificar los materiales; elegir una malla y precisión; elegir condiciones de contorno; y especificar la longitud de onda o el rango de longitudes de onda. Luego, las ecuaciones de Maxwell se formulan en un problema matricial de autovalores y se resuelven para obtener el índice efectivo y los perfiles del modo, de los modos de la guía de onda [13]. Las simulaciones se pueden repetir para distintivas geometrías, por ejemplo barriendo el ancho de la guía de ondas como las vistas en la figura 2.9.

Los cálculos de Modos se utilizan a lo largo de este trabajo para calcular: parámetros de propagación en guía de ondas; radiación en curvaturas de guías de ondas; coeficientes de acoplamiento en anillos resonadores (aproximaciones) y coeficientes de reflexión para redes de Bragg;

3.2.2. Propagación de ondas

El diseño de dispositivos fotónicos requiere comprender cómo se propagará la luz dentro de la estructura. Para dispositivos uniformes como guías de ondas acanaladas, los solucionadores de modos mencionados anteriormente son suficientes, ya que el modo no cambia mientras se propaga por la guía de ondas.

Sin embargo, la mayoría de los dispositivos presentan variaciones en la estructura a medida que la luz se propaga, lo que puede causar numerosos reflejos, interferencias, dispersión, radiación, interacción entre múltiples modos y cambios en el perfil del modo. Existen diversas técnicas para resolver la propagación de ondas. Algunas se desarrollaron para problemas específicos, mientras que otras son más generales. El enfoque más general y riguroso en el dominio del tiempo, es el método de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (FDTD por sus siglas en inglés). Este método, podríamos decir que es el caballo de batallas en el diseño de la fotónica del silicio y se utiliza ampliamente en este trabajo.

3D FDTD

La técnica FDTD es un método numérico para resolver las ecuaciones de Helmholtz en 3 dimensiones (3D) [15] [16]. Esta técnica es útil particularmen-

te para analizar la interacción de luz con estructuras complejas, que emplean características de escala inferior a la longitud de onda. FDTD es un cálculo numérico"exacto" de las ecuaciones de Helmholtz, en donde la precisión converge hacia una solución exacta a medida que se reduce la discretización espacial del volumen, es decir, un tamaño de malla más pequeño. Como lo sugiere su nombre, FDTD opera en el dominio del tiempo. FDTD simula la propagación de un pulso de luz (de decenas a cientos de femtosegundos de duración), que contiene un amplio espectro de componentes de longitudes de onda. La respuesta del sistema a este pulso corto está relacionada con el espectro de transmisión mediante la transformada de Fourier. Así, una única simulación proporciona la respuesta del sistema óptico para una amplia gama de longitudes de onda a la vez (similar a la respuesta al impulso $h(t)$). FDTD puede modelar materiales dispersivos y no lineales, e incluso puede ampliarse para incluir interacciones electrónicas como las que se encuentran en láseres semiconductores y amplificadores ópticos [17]. La desventaja de la técnica 3D FDTD es que requiere mucha recurso computacional, esto debido a que el incremento del tiempo en la simulación es inferior al femtosegundo y requiere el cálculo de los campos en las tres componentes espaciales, en cada instante de tiempo. Sin embargo, el algoritmo se adapta bien a simulaciones en múltiples procesadores y clústeres, por lo que el volumen y la precisión de la simulación se pueden mejorar con recursos informáticos adicionales [18], incluidas unidades de procesamiento gráfico (GPU) [19]. En este trabajo se emplearon dos equipos para este enfoque de simulaciones. La primera unidad cuenta con un procesador Intel Core i7 a 3.60 Ghz y una memoria RAM de 32 GB. La segunda unidad presenta un procesador Intel Core i7 a 3.20 Ghz, 32GB de memoria RAM y además de una unidad de procesamiento gráfico (GPU) NVIDIA GeForce RTX 2060, ideal para este tipo de cálculos.

La herramienta numérica empleada en este trabajo es Lumerical FDTD Solutions. Este programa modela de manera eficiente y precisa la respuesta del dispositivo en un amplio rango de bandas ópticas, incluso teniendo en cuenta la dispersión del material. El software es capaz de generar parámetros de dispersión (Parámetros S), equivalente a la función de transferencia para dispositivos, lo cual es muy útil en el modelado de sistemas ópticos. Los cálculos FDTD se utilizaron a lo largo de este trabajo para calcular: curvaturas en guías de onda, redes de Bragg, divisores de potencia, anillos resonadores y otros.

2D FDTD con el método de índice efectivo.

También conocido como 2.5D FDTD, este enfoque es muy adecuado para circuitos integrados fotónicos planos. Este método se puede utilizar desde sistemas basados en guías de ondas tipo ridge y rib, hasta geometrías más complejas, como cristales fotónicos. Utilizando el algoritmo 2D FDTD, se permite la propagación de ondas en todas las direcciones sin hacer suposiciones sobre un eje óptico. Esto permite modelar de manera eficiente estructuras como anillo resonadores y demultiplexadores de longitud de onda por etapas (AWG). El beneficio de este enfoque es que puede modelar rápidamente dispositivos en una escala de cientos de micrones. Este método viene incluido en Lumerical MODE Solutions [20]. En este enfoque, una estructura 3D se convierte en una simulación FDTD 2D utilizando el método de índice efectivo [21], donde los índices efectivos utilizan el método variacional [22] o de reciprocidad [23]. El modelo toma una estructura tridimensional (3D) y la simplifica a una forma bidimensional (2D) utilizando índices efectivos. Estos índices efectivos son valores que representan cómo se comporta la luz en la estructura original en 3D. Una vez que se tiene esta representación en 2D, se puede utilizar el método FDTD 2D para resolver y analizar el comportamiento de la luz en la estructura. La forma 2D resultante es como una "vista desde arriba"del circuito fotónico integrado, lo que facilita su análisis y modelado. El supuesto principal de este método es que existe poco acoplamiento entre diferentes modos. Por lo tanto no es conveniente utilizar este método cuando existe un fuerte acoplamiento entre modos, o la estructura soporta una gran cantidad de modos. Dado que la velocidad de cálculo de las simulaciones FDTD-2D disminuyen drásticamente al reducir el problema a dos dimensiones, el método toma fuerza para modelar de manera rápida dispositivos con áreas grandes.

3.2.3. Método de expansión de auto-modos (EME)

El método de expansión de auto-modos (Eigenmode Expansion Method -EME) o Propagación de Modos, analiza cómo se propaga la luz dividiendo el campo de luz en una serie de modos específicos en cada posición a lo largo del dispositivo. A esta combinación lineal de auto-modos en cada punto se lo denomina "supermodos". Básicamente, EME descompone el comportamiento complejo de la luz en una serie de patrones más simples que pueden ser estudiados y entendidos individualmente. Mientras viajen en un medio uniforme (por ejemplo, una sección de una guía de ondas, un acoplador direccional, el rectángulo de un Interferómetro Multi Modal-MMI), cada modo se propaga individualmente y simplemente se van

multiplicando por las constantes complejas de propagación. Estos parámetros no solo consideran la transferencia de potencia óptica entre modos propios y secciones, sino que también tienen en cuenta las transmisiones y reflexiones en cada interfaz. Para conectarse a la siguiente sección del dispositivo, se utilizan los parámetros "S"(parámetros de dispersión), por lo que el método es inherentemente bidireccional, lo que significa que considera tanto la propagación de la señal en dirección hacia adelante como hacia atrás en cada interfaz. La técnica logra una alta precisión cuando se considera un número infinito de modos de propagados. Al tener en cuenta un gran número de modos, la técnica puede manejar la propagación de la luz en ángulos grandes y hacerlo con un nivel de precisión que puede ser ajustado tan fino como se desee (precisión arbitraria). En otras palabras, al aumentar la cantidad de modos considerados, la técnica puede modelar la propagación de la luz de manera muy detallada y exacta. Esta técnica es muy adecuada para estructuras como acopladores MMI, tapers, acopladores direccionales, gratings, entre otros dispositivos con sección uniforme. Este método puede ser implementado en Lumerical Mode.

3.2.4. Método de propagación del haz (BPM)

El método BPM era una solución aproximada que solía ser popular antes de los avances en el software FDTD y las mejoras en las velocidades de las computadoras, las cuales ahora permiten resolver de manera “exacta” las ecuaciones de onda de Helmholtz. El método mencionado fue diseñado para analizar estructuras en las que las variaciones son suaves y graduales. Este método simplifica la propagación de la luz considerando solo ángulos pequeños y asumiendo que la luz se mueve principalmente hacia adelante. Esta técnica es especialmente útil para estructuras donde las diferencias en los índices de refracción son pequeñas. Además, suele tratar el problema de manera escalar, lo que significa que se enfoca en la magnitud de la onda de luz y no en su dirección o polarización. La técnica se ha ampliado para permitir la propagación en ángulos grandes; propagación hacia adelante y hacia atrás, considerando las reflexiones en las interfases y vectorial, o sea que también tiene en cuenta la dirección y la polarización de la luz. Synopsys RSoft BeamPROP es un software que implementa estas mejoras, permitiendo un análisis más completo y preciso de cómo se propaga la luz en diferentes estructuras con este método.

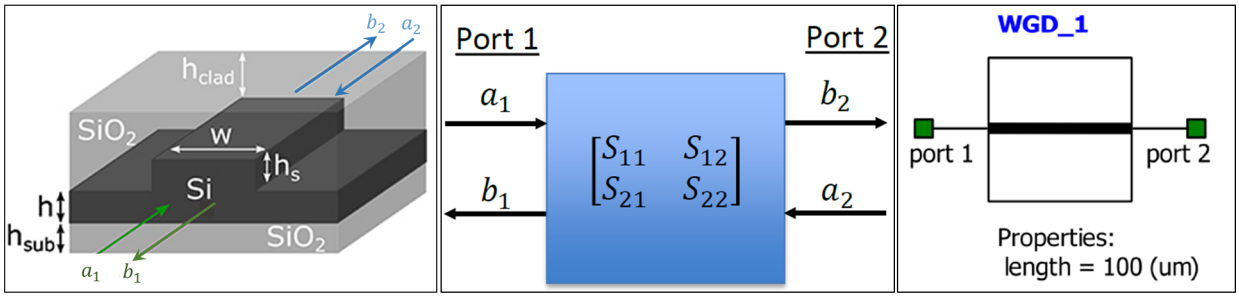
3.2.5. Modelado de circuitos ópticos.

Existen varios enfoques y herramientas disponibles para diseñar circuitos fotónicos de silicio que contienen numerosos componentes. La idea general es construir modelos simples para los componentes. Las simulaciones se centran en la funcionalidad y el rendimiento de todo el circuito. Hay muchos métodos disponibles para implementar modelos compactos para simular dispositivos y subsistemas que tienen soluciones analíticas, o para sistemas que son demasiado grandes para ser manejados efectivamente por métodos numéricos. En estos últimos casos, se pueden utilizar modelos fenomenológicos, como guías de onda parametrizadas, para simplificar la simulación de circuitos más grandes. Las simulaciones deseadas incluyen la respuesta en el dominio de las frecuencias del sistema (caracterización del filtro óptico) y simulaciones en el dominio del tiempo (transitorias, diagramas de ojo, tasa de error de bit).

Para el modelado de circuitos ópticos, las opciones incluyen: construir modelos de circuitos simples en un lenguaje de programación y usar herramientas que simulen la respuesta del circuito tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia. En este trabajo, la herramienta para el modelado de circuitos ópticos es Lumerical INTERCONNECT [24]. Es un software de diseño de circuitos fotónicos integrados, que permite el diseño, simulación y análisis de circuitos integrados, fotónica de silicio e interconexiones ópticas que contienen dispositivos como moduladores Mach-Zehnder, anillos resonadores acoplados y demultiplexores de longitud de onda (Arrayed Waveguides Gratings - AWG). INTERCONNECT incluye simuladores en el dominio del tiempo y de la frecuencia. En el dominio del tiempo, el simulador realiza cálculos para cada componente del sistema en estudio. Estos cálculos permiten generar muestras de la forma en que las señales cambian a lo largo del tiempo, es decir, cómo se comporta la forma de onda de la señal a medida que pasa el tiempo, y luego las propaga en ambas direcciones. Esto permite simular acoplamientos muy cercanos entre componentes, lo que facilita, por ejemplo, el análisis de resonadores ópticos. La simulación en el dominio de la frecuencia se realiza utilizando el análisis de datos de dispersión para calcular la respuesta general del circuito. Se realiza resolviendo una matriz S (3.1), y que representa al circuito como "matrices de dispersión" conectadas, cada una de ellas representando la respuesta en frecuencia de un elemento individual. Los elementos individuales pueden construirse utilizando datos experimentales, modelos analíticos o fenomenológicos, o modelos calculados numéricamente (por ejemplo, mediante FDTD o un solucionador de modos).

El método parámetros S (matrices de dispersión) implica asignar una función

matricial compleja basada en la longitud de onda (3.2), que incluye la amplitud y fase de respuesta, así como la transmisión y reflexión, de cada puerto del componente fotónico. Para aclarar este método, podemos tomar como ejemplo el caso más básico, como la guía de onda (Figura 3.2) con dos puertos (entrada/salida), se puede modelar utilizando parámetros S de la siguiente manera:



a) Modelo de una guía de onda b) Modelo matricial - S c) Modelo compacto en Interconnect

Figura 3.2: Modelo de una guía de onda en parámetros-S y su equivalente compacto en Interconnect.

La matriz S es compleja: describe la amplitud reflejada/transmitida entre puertos:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

$$\text{Pérdidas de inserción - IL } = -20log_{10}|S_{21}|\,[\text{dB}]$$
$$\text{Pérdidas de retorno - RL } = -20log_{10}|S_{11}|\,[\text{dB}]$$

Matriz-S para una guía de ondas ideal de Longitud L:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & e^{-\frac{\alpha}{2}L}e^{-i\beta L} \\ e^{-\frac{\alpha}{2}L}e^{-i\beta L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

$$\alpha \equiv \text{ Propagation Loss } \left[\text{cm}^{-1}\right]$$
$$\beta \equiv \text{ Propagation Constant } = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}}\,(\lambda)$$

3.3. Diseño de guías de onda.

El primer paso para desarrollar cualquier dispositivo fotónico, es el diseño de la guía de onda en el nodo tecnológico que se pretende trabajar, generalmente sigue el siguiente procedimiento: Primero, se realizan cálculos unidimensionales

(1D) para determinar los modos de la guía de onda, según lo soportado por la oblea (con el recubrimiento adecuado, por ejemplo, óxido). Esto se puede hacer de forma analítica o numéricamente. El espesor del silicio se elige según los requisitos del dispositivo, por ejemplo, que la guía de onda soporte solo un modo TE y TM. El espesor suele estar limitado a lo disponible por la "foundrie", por ejemplo, en el nodo tecnológico SOI, un espesor de 220 nm y silicio grabado (etching) con una profundidad de 90 nm.

Para el espesor dado, se busca un ancho adecuado para la guía de onda, para cumplir con los requisitos del dispositivo, por ejemplo, que la guía de onda soporte solo un modo de TE y TM. Esto se puede hacer utilizando el método de índice efectivo (EIM), o un método totalmente vectorial 2D. Se deben considerar también las pérdidas por curvatura de la guía de onda, las pérdidas en el sustrato, etc.

3.3.1. Modelado numérico de guías de ondas.

Primero, modelamos la guía de onda utilizando una herramienta numérica para calcular los modos, el software empleado es Lumerical Mode Solutions. A continuación, se dibuja una guía de onda plana (1D), luego se simulan los modos en esta guía de onda. Esta geometría admite solo dos modos a 1550 nm. Los dos primeros modos de la guía de onda plana se muestran en la Figura 3.3 (izquierda) para la polarización TE y la Figura 3.3 (derecha) para la polarización TM.

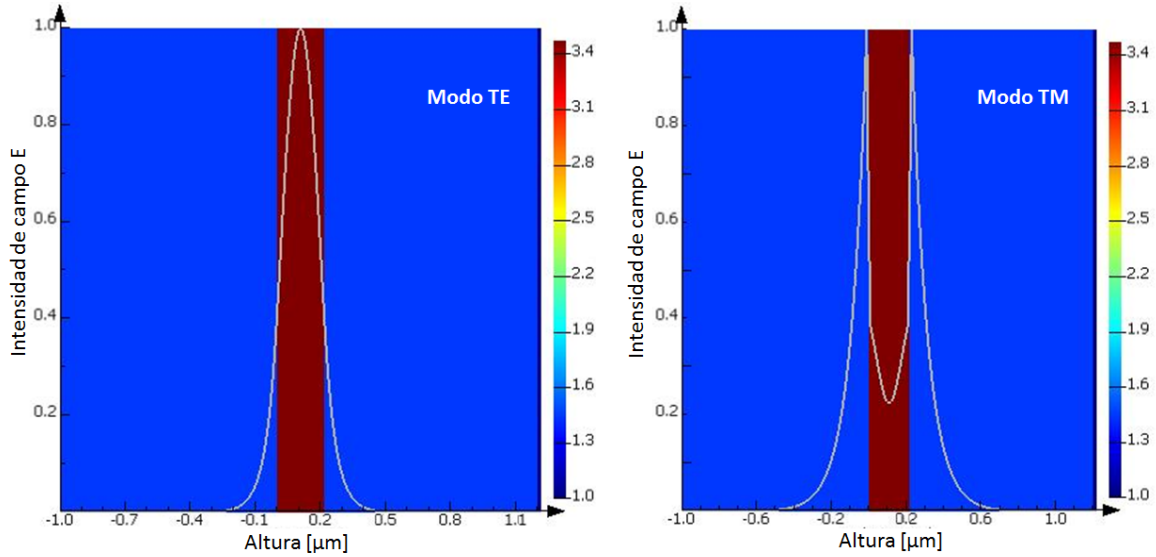


Figura 3.3: (Izquierda): Perfil del modo fundamental de la guía de onda plana (TE). El índice efectivo de este modo es 2,85. (Derecha): Perfil del 2do modo fundamental de la guía de onda plana (TM). El índice efectivo de este modo es 2,01. Los modos se calcularon mediante un solucionador de auto-modos (*Lumerical Mode*). La dimensión de la guía de onda se indica mediante el área de color bordo.

El método empleado es el del índice efectivo (EIM). Las figuras también muestran que los perfiles de campo se desintegran a diferentes velocidades, es decir, el modo TE tiene un confinamiento más fuerte que el modo TM. En general, los modos con índices efectivos más altos, están confinados más estrechamente en la guía de onda y tienen colas evanescentes que decaen más rápidamente. La desintegración del perfil de campo en el revestimiento (cladding) se puede aproximar mediante:

$$E \propto e^{-\frac{2\pi d}{\lambda}\sqrt{n_{\text{eff}}^2 - n_c^2}}$$

donde E es la amplitud del campo a una distancia, d, de la interfaz entre el núcleo y el revestimiento, n_{eff} es el índice efectivo del modo y n_c es el índice de refracción del revestimiento.

3.3.2. Método del Índice Efectivo 2D.

Para calcular el índice efectivo de la sección transversal de una guía de onda 2D (sección de la guía de onda strip de la Figura 2.9(a2)), se puede utilizar el Método del Índice Efectivo. Aunque las soluciones completamente vectoriales en 2D son más precisas, este método proporciona una comprensión útil sobre el funcionamiento de las guías de onda y es rápido de implementar, por lo que se usa en el diseño de moduladores y en simulaciones 2.5 FDTD.

Para los modos cuasi-TE, primero se encuentra el modo TE de una guía plana (1D) en la dirección por fuera del plano, luego se calcula el modo TM en la dirección del plano usando el índice efectivo de la guía plana. Este cambio de polarización es necesario ya que estamos resolviendo un problema 2D mediante dos simulaciones (1D). Para los modos cuasi-TM, el procedimiento es inverso: primero se calcula el modo TM de la guía plana y luego el modo TE.

Como ejemplo, para hallar el modo cuasi-TE, se calcula el índice efectivo de la guía plana (1D) en la sección transversal por fuera del plano y luego se usa este índice como entrada para calcular el índice efectivo de la guía 2D. Esto da como resultado un índice efectivo de 2.49 para el modo TE en una guía de onda con perfil de campo. Usando este último perfil del modo y el perfil del modo la Figura 3.3, podemos construir el perfil del modo 2D. El supuesto inherente en el Método del Índice Efectivo es que los campos son separables, de manera similar al método de "separación de variables" para resolver ecuaciones diferenciales. El perfil de campo en 2D $E(x, y)$, se expresa como el producto de los perfiles de campo en cada dimensión, es decir, $E(x, y) = E(x) \cdot E(y)$, donde $E(x)$ y $E(y)$ corresponden a los campos en las direcciones x e y respectivamente.

Por último, encontramos la solución 2D totalmente vectorial para la sección transversal de la guía de ondas (2D). En donde encontramos los perfiles de modo para los modos cuasi-TE y cuasi-TM, y observamos la intensidad del campo eléctrico, la intensidad del campo magnético y la densidad de energía, como se mostraron en las Figuras 2.10 (guia strip) y 2.11 (guía rib).

3.4. Dispositivos Fotónicos Integrados (PICs)

En esta sección se describen resumidamente los componentes fundamentales más comunes en la fotónica integrada. En particular, se destacarán los elementos utilizados en esta tesis: atenuadores lineales o *lineal tapers*, divisor de potencia en Y, interferómetro multimodal MMI, Anillo resonador óptico, redes de Bragg y *Arrayed waveguide gratings* (AWG).

3.4.1. Linear tapers

Los *linear tapers* o atenuadores lineales, son uno de los componentes más comunes de la fotónica de silicio y a partir del cual se conectan otros elementos. Se utiliza para controlar la intensidad de la luz de manera gradual a lo largo de una guía de ondas [25]. El acoplamiento de luz eficiente entre dos guías de ondas dentro de un circuito óptico se puede realizar con este tipo de guías de ondas con forma de cono o "taper", como se muestra en la figura 3.4 a. La eficiencia del acoplamiento se puede controlar mediante la longitud y la forma del taper (figura 3.4 b). Esto puede ser útil en diversas aplicaciones, como en la compensación de pérdidas de señal en sistemas de comunicación óptica o en la implementación de atenuadores ajustables en circuitos fotónicos.

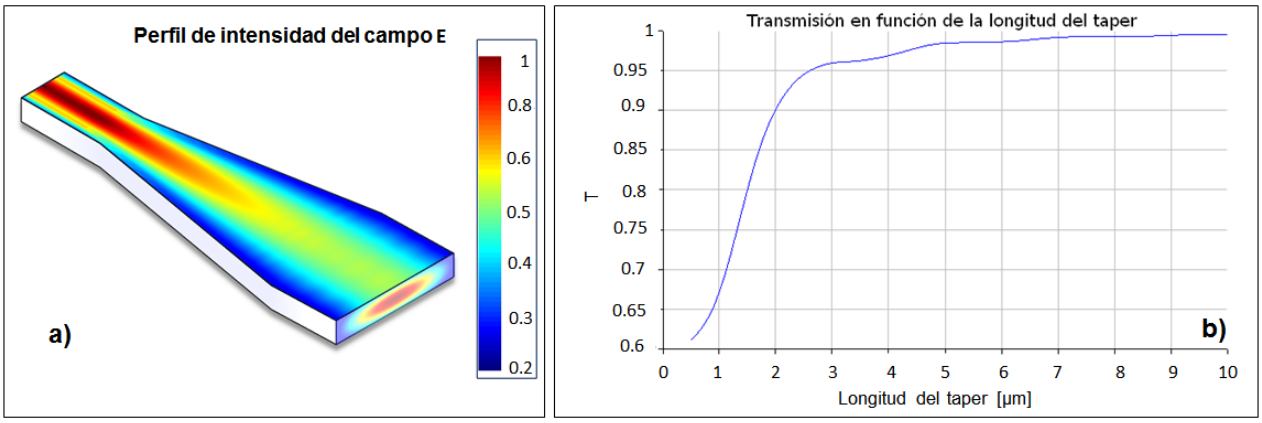


Figura 3.4: a) Intensidad del campo E a lo largo del *linear taper*. b) Optimización de la transmisión óptica T barriendo L[μm]

El diseño del *linear taper* se parametriza mediante las ecuaciones 3.3 y 3.4:

$$W(x) = \alpha(L - x)^m + w_2 \tag{3.3}$$

$$\alpha = (w_1 - w_2)/(L^m) \tag{3.4}$$

Donde $W(x)$ determina la anchura de la guía de onda a lo largo de su longitud x, w_1 y w_2 determinan la conicidad de la guía de onda a izquierda y derecha respectivamente, L es el largo del taper y α un coeficiente que controla la tasa de cambio de la anchura de la guía de onda a lo largo de la longitud L.

Los *linear tapers* fueron simulados y optimizados con el método Método de expansión de modos propios (EME), se pudo extraer los parametros-S en función de la longitud de onda y crear un modelo compacto de para usarse en Interconnect.

3.4.2. Acopladores Direccionales.

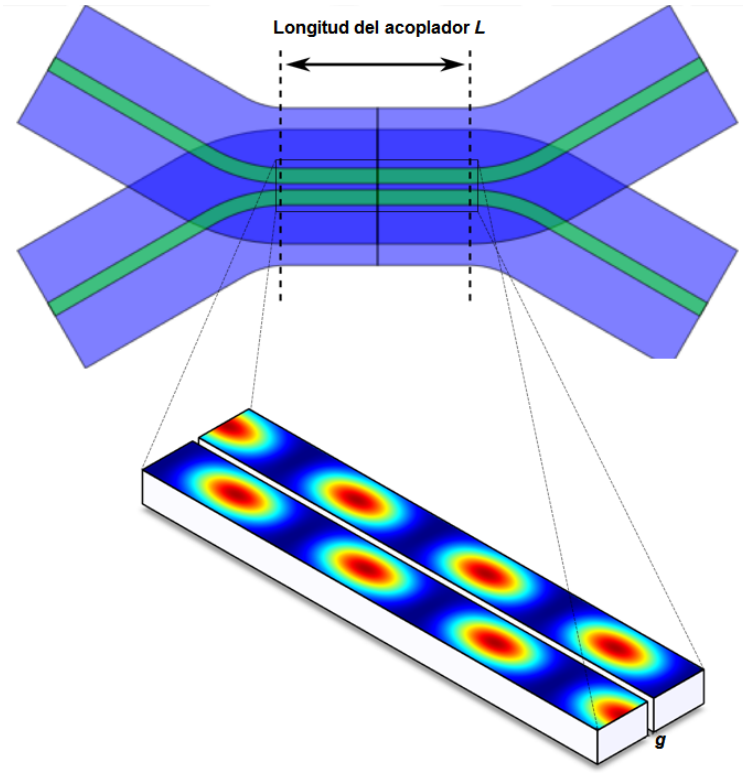


Figura 3.5: Esquema de un acoplador direccional y perfil del modo a lo largo del acoplador.

El acoplador direccional es el método más común de dividir y combinar luz en sistemas fotónicos, especialmente en fibras ópticas. El acoplador direccional consiste en dos guías de onda paralelas, donde el coeficiente de acoplamiento

está controlado tanto por la longitud del acoplador como por el espaciado entre las dos guías de onda. En la fotónica de silicio, estos acopladores direccionales pueden implementarse usando cualquier tipo de guía de onda, incluidas las guías de onda *rib* y *strip*. Los acopladores direccionales en este trabajo se basan en guías de onda *rib* con polarización *quasi-TE*, ya que estos se utilizan posteriormente para construir moduladores de anillo. Un diagrama de un acoplador direccional se muestra en la Figura 3.5.

El comportamiento de un acoplador direccional se puede encontrar usando la teoría de modo acoplado (CMT)[26] [27]. La fracción de la potencia acoplada de una guía de onda a la otra se puede expresar como:

$$\kappa^2 = \frac{P_{\text{cross}}}{P_0} = \sin^2(C \cdot L), \tag{3.5}$$

donde P_0 es la potencia óptica de entrada, P_{cross} es la potencia acoplada a través del acoplador direccional, L es la longitud del acoplador, y C es el coeficiente de acoplamiento. La fracción de la potencia que permanece en la guía de onda "*through*", asumiendo un acoplador sin pérdidas ($\kappa^2 + t^2 = 1$), es:

$$t^2 = \frac{P_{\text{through}}}{P_0} = \cos^2(C \cdot L). \tag{3.6}$$

Para obtener el coeficiente de acoplamiento, utilizamos el análisis de "supermodo", basado en un cálculo numérico de los índices efectivos, n_1 y n_2, de los dos primeros auto-modos de las guías de onda acopladas. Estos dos modos, mostrados en la Figura 3.6, se conocen como modos simétricos y antisimétricos.

El enfoque del supermodo, a menudo se denomina método de expansión del auto-modo (EME). Este enfoque es más preciso (especialmente para guías de ondas de alto índice de contraste con fuerte acoplamiento) que el enfoque tradicional de la teoría del modo acoplado (CMT), donde el coeficiente de acoplamiento se encuentra mediante métodos perturbativos. A partir de estos dos supermodos, se encuentra el coeficiente de acoplamiento:

$$C = \frac{\pi \Delta n}{\lambda} \tag{3.7}$$

donde Δn es la diferencia entre los índices efectivos, $n_1 - n_2$.

La idea detrás del acoplador puede explicarse mediante la propagación de los dos modos (Figura 3.6 (a) y 3.6 (b)) con diferentes constantes de propagación:

$$\beta_1 = \frac{2\pi n_1}{\lambda} \tag{3.8}$$

$$\beta_2 = \frac{2\pi n_2}{\lambda} \tag{3.9}$$

A medida que los modos viajan, la intensidad del campo oscila entre las dos guías de onda, como se muestra en las Figura 3.5. Con los dos modos en fase, la potencia se localiza en la primera guía de onda. Después de un desfase de π entre los modos, la potencia se localiza en la segunda guía de onda. Esto ocurre después de una distancia llamada longitud de cruce, L_X, y se encuentra mediante:

$$\beta_1 L_X - \beta_2 L_X = \pi \tag{3.10}$$

$$L_X \left[\frac{2\pi n_1}{\lambda} - \frac{2\pi n_2}{\lambda}\right] = \pi \tag{3.11}$$

$$L_X = \frac{\lambda}{2\Delta n} \tag{3.12}$$

Empezamos la simulación numérica del acoplador direccional, utilizando el solucionador de auto-modos (*Lumerical Mode*) y encontramos los perfiles de los modos de la Figura 3.6.

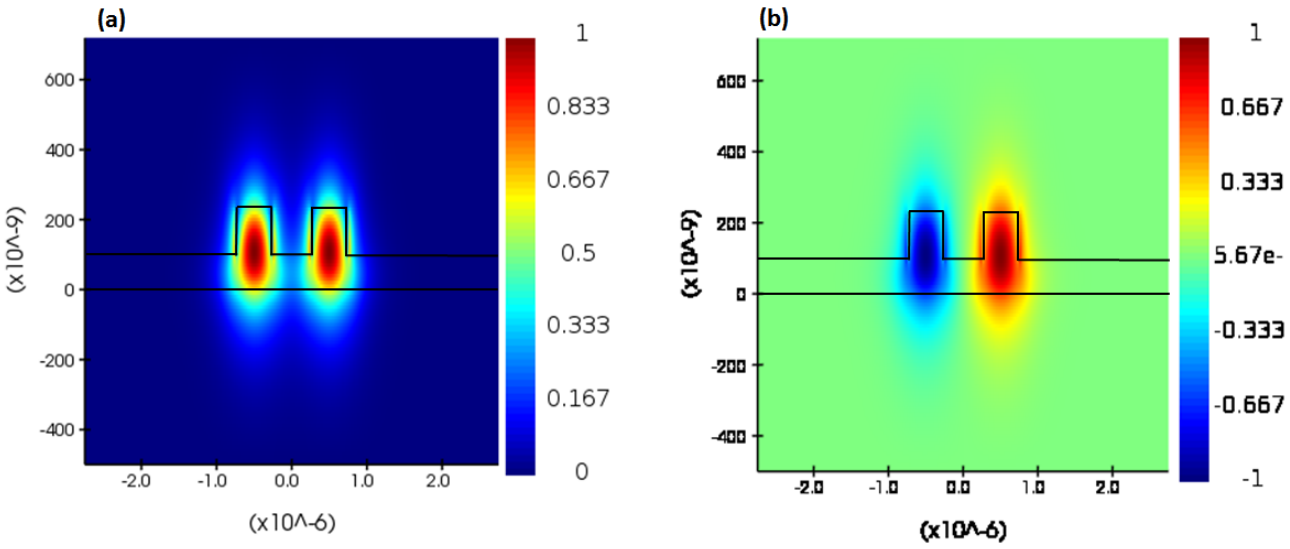


Figura 3.6: Dos modos fundamentales de un acoplador direccional. (a) Intensidad del campo E. (b) La naturaleza asimétrica del perfil del segundo modo es evidente en el cruce por cero en el centro del gap con λ = 1550 nm, espacio del gap = 200 nm, guías de ondas *rib* de 500 nm × 220 nm con una losa (slab) de 90 nm.

Dependencia del gap del acoplador.

A continuación se muestra el coeficiente de acoplamiento vs. el gap entre las guías. La longitud de cruce, L_x se representa en la Figura 3.7 Se encuentra que

el acoplamiento depende de la distancia g entre las guías de onda, y que tiene un comportamiento exponencial:

$$C = B \cdot e^{-A \cdot g} \tag{3.13}$$

donde A y B dependerán de la geometría del acoplador, longitud de onda, etc.

Podemos ajustar los datos de la longitud de cruce de la Figura 3.7, con el resultado para este caso (guía de onda de 500 × 220 nm con losa de 90 nm) siendo:

$$L_x = 10^{(0{,}00260848 * g[nm] + 0{,}657094)} [\mu m] \tag{3.14}$$

Por ejemplo, el acoplador con un gap $g = 200$ nm tiene una longitud de cruce de $L_x = 15{,}1$ μm. Usando el ajuste en la Ecuación 3.14, podemos calcular el coeficiente de acoplamiento de campo κ, usando la Ecuación 3.5, para cualquier acoplador direccional con brecha (gap) o longitud:

$$\kappa = \left(\frac{P_{Coupled}}{P_0} \right)^{1/2} = \sin\left(\frac{\pi \Delta n}{\lambda} \cdot L \right) = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{z}{L_x} \right) \tag{3.15}$$

Como ejemplo, el acoplamiento de campo κ, para un acoplador de 15 μm de longitud. Se computa que el acoplador de 15 μm tiene un acoplamiento casi nulo para un gap de 100 nm. Esto se debe a que la longitud de cruce es 8 μm, en donde la luz pasa por (casi) un ciclo completo, (casi) toda la potencia queda atrapada en la guía de onda de entrada original.

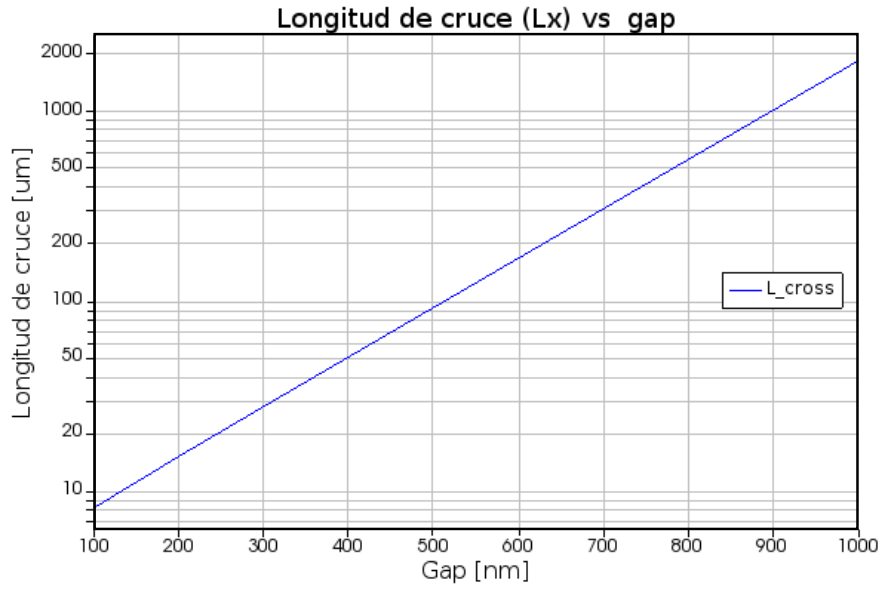


Figura 3.7: Longitud de cruce L_x, versus gap, con $\lambda = 1550$ nm, espacio del gap = 200 nm, guías de ondas de 500 nm × 220 nm con una losa (slab) de 90 nm.

La dependencia de la longitud del acoplador se puede encontrar utilizando la ecuación 3.15 y se observa en la Figura 3.8. Para diseñar un acoplador con un acoplamiento deseado, por ejemplo 10 %, estas ecuaciones se utilizan para identificar un conjunto de parámetros del dispositivo (como: g = 200 nm y L = 3 μm).

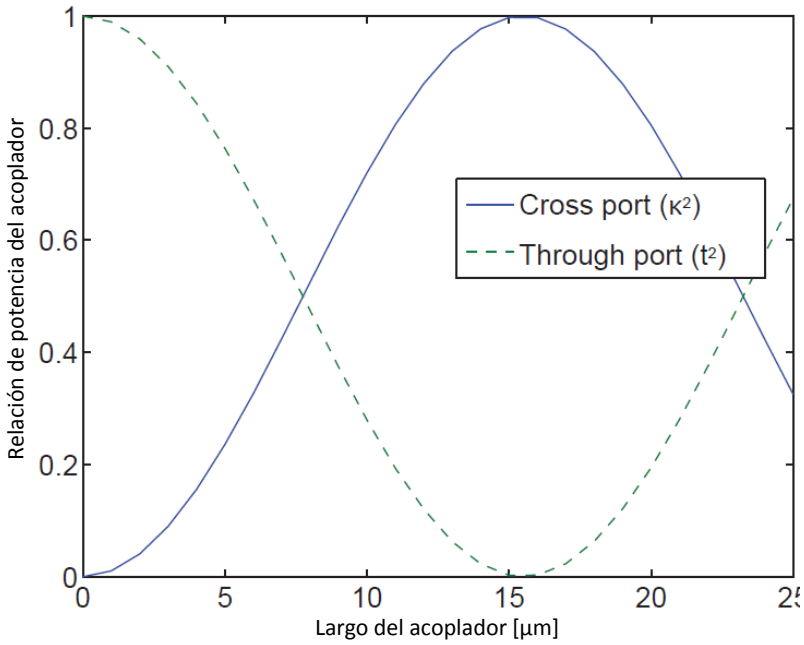


Figura 3.8: Gráfica de κ versus longitud del acoplador ideal (solo guías de ondas paralelas, sin curvas), con λ = 1550 nm, espacio del gap = 200 nm, guías de ondas de 500 nm × 220 nm con una losa (slab) de 90 nm.

3.4.3. Divisor de potencia Y branch

El papel del Y branch es dividir la luz de una guía de onda en dos guías de onda (divisor) o combinar la luz de dos guías de onda en una (combinador). Un dispositivo de ejemplo se muestra en la Figura 3.9. Es sencillo entender la funcionalidad de división: para una intensidad de entrada, I_i, la luz se divide por igual, por lo tanto, cada salida tiene intensidad $I_1 = I_2 = I_i/2$. Sin embargo, el combinador es menos intuitivo y se explicará en esta sección.

Describimos un modelo simple para el divisor/combinador de rama en Y, basado en el formalismo para un divisor de haz 50/50 %. El punto fundamental es que el Y branch puede considerarse como un dispositivo de tres puertos. Desde una perspectiva de auto-modos, es en realidad un sistema con múltiples modos de entrada y múltiples modos de salida (por ejemplo, dos y dos). En el caso de una guía de onda de entrada, hay (al menos) dos modos que deben considerarse:

el modo fundamental de la guía de onda, y ya sea el modo de segundo orden o modos de radiación.

Para el divisor, comenzamos con una intensidad de entrada, I_i, con campo eléctrico E_i. La luz se divide por igual en las dos ramas. Así, cada salida tiene una intensidad $I_1 = I_2 = I_i/2$, y campo eléctrico $E_1 = E_2 = E_i/\sqrt{2}$ (ya que $I \propto |E|^2$).

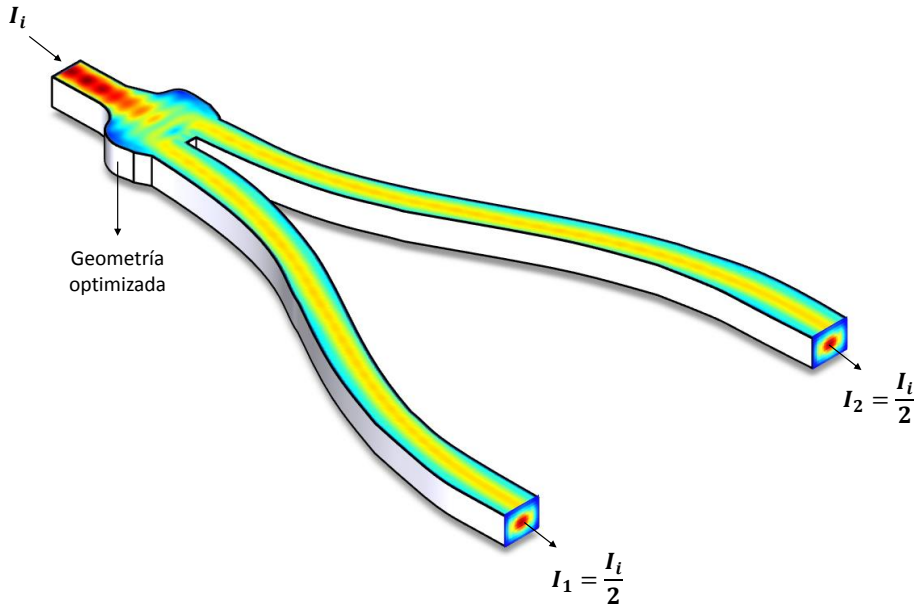


Figura 3.9: Esquema del divisor de potencia en rama Y branch.

Para el combinador, se aplican las mismas ecuaciones, es decir, la luz que entra en una guía de onda, I_1, se divide por igual entre el modo fundamental de la guía de onda y el segundo modo de orden (o modo de radiación). Por lo tanto, la luz en el puerto combinado será $I_i = I_1/2$, y el campo será $E_i = E_1/\sqrt{2}$.

Así, la rama en Y funciona como un divisor de haz 50/50 % en ambas direcciones. Un punto importante es que no es posible combinar dos haces incoherentes de luz usando una rama en Y para aumentar la potencia. También es importante notar que al usar un combinador, si la luz solo está presente en un puerto, la salida se reducirá a la mitad de la entrada.

En realidad, las ramas en Y no son divisores perfectos 50/50 % y tienen pérdidas excesivas. La geometría de la rama en Y necesita ser optimizada usando FDTD. Usando un algoritmo genético y variando los anchos de la rama en Y en varios lugares a lo largo del dispositivo, la pérdida de inserción se optimizó para ser menos de 0.3 dB [28]. La geometría resultante se muestra en la Figura 3.9.

Las simulaciones para el Y branch se realizaron con FDTD 3D (ver Figura

3.10(a)). Entonces mediante un script se carga el diseño de un Y branch y se realiza varias simulaciones que son útiles para visualizar los resultados, entender la pérdida de inserción y transmisión en los puertos en función de la longitud de onda. Primero, la luz se lanza en la entrada del divisor, y se obtienen los resultados mostrados en la Figura 3.10 En este caso, la luz se divide por igual entre los dos puertos.

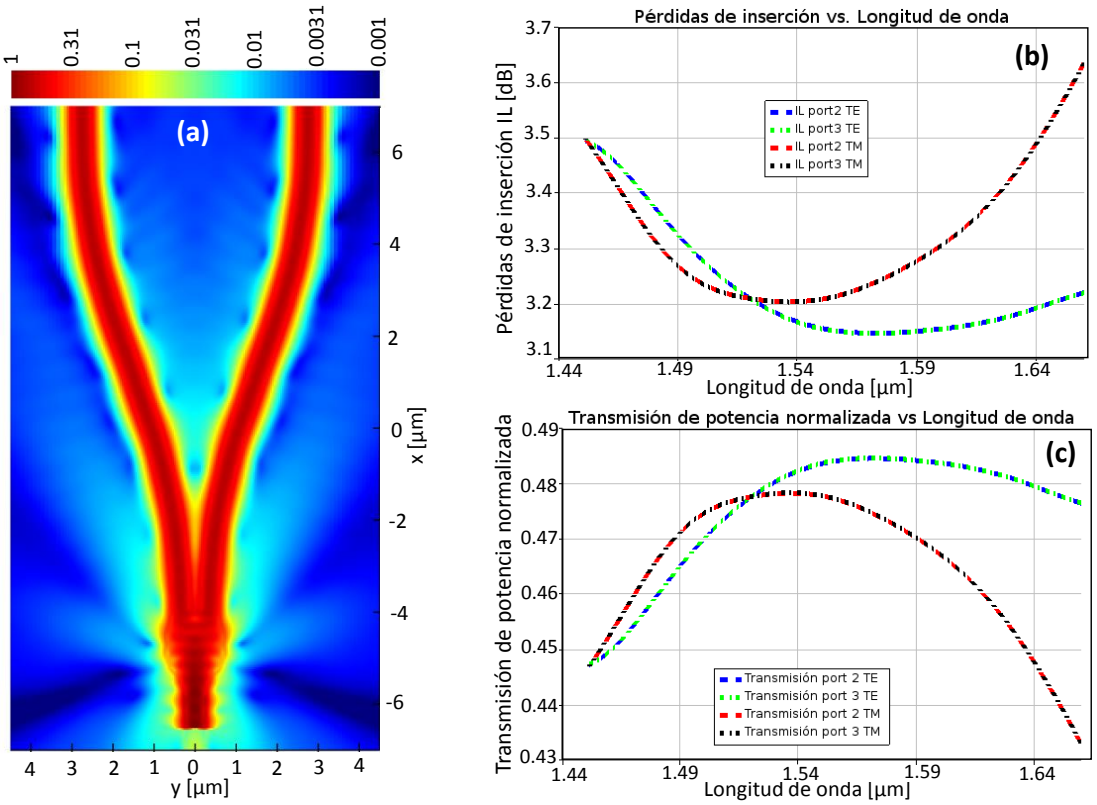


Figura 3.10: (a) Simulación 3D FDTD del Y branch optimizado. (b). Pérdidas de inserción en ambos puertos de salida. (c) Transmisión de la potencia normalizada en ambos puertos de salida.

La Figura 3.10(c) traza la transmisión de potencia normalizada (abs^2 de los Parámetros-S, ver 3.2.5) desde el puerto 1 al puerto 2 y al puerto 3 en los modos TE y TM. El gráfico indica que la relación de división de la rama Y es aproximadamente 50-50 y no es muy sensible con respecto a la longitud de onda.

La pérdida de inserción dividida para el Y branch, mide la pérdida de potencia de la señal desde la inserción de la rama Y empezando por el puerto de entrada (puerto 1) a cada puerto de salida (puerto 2 y puerto 3). La pérdida de inserción generalmente se mide en dB. Con la unión optimizada para la rama Y, vemos una pérdida de inserción muy pequeña para un ancho de banda operativo amplio, como se indica en la Figura 3.10(b).

Ahora analizamos el Y branch como combinador. Tenemos 3 casos, el primero es con luz en un puerto único del combinador. En este caso, se excitan dos modos en la salida, el modo fundamental y el modo TE de segundo orden. La pérdida de inserción se calcula realizando integrales de superposición de modos, para determinar la cantidad de potencia en el modo fundamental.

El segundo caso considera dos entradas en fase en el combinador; En esta situación, las dos fuentes son coherentes, por lo que se ocurre una interferencia constructiva en el modo fundamental del puerto de salida. En este caso, la potencia en la guía de ondas debería acercarse al 100 %.

Finalmente, la última simulación considera dos entradas desfasadas en el combinador; en esta situación, se observa interferencia destructiva en el modo fundamental del puerto de salida. En este caso, la potencia en el modo fundamental de la guía de onda debería acercarse al 0 %, y toda la potencia pasará al modo TE de segundo orden o a los modos de radiados.

3.4.4. Interferómetro Multimodal - MMI.

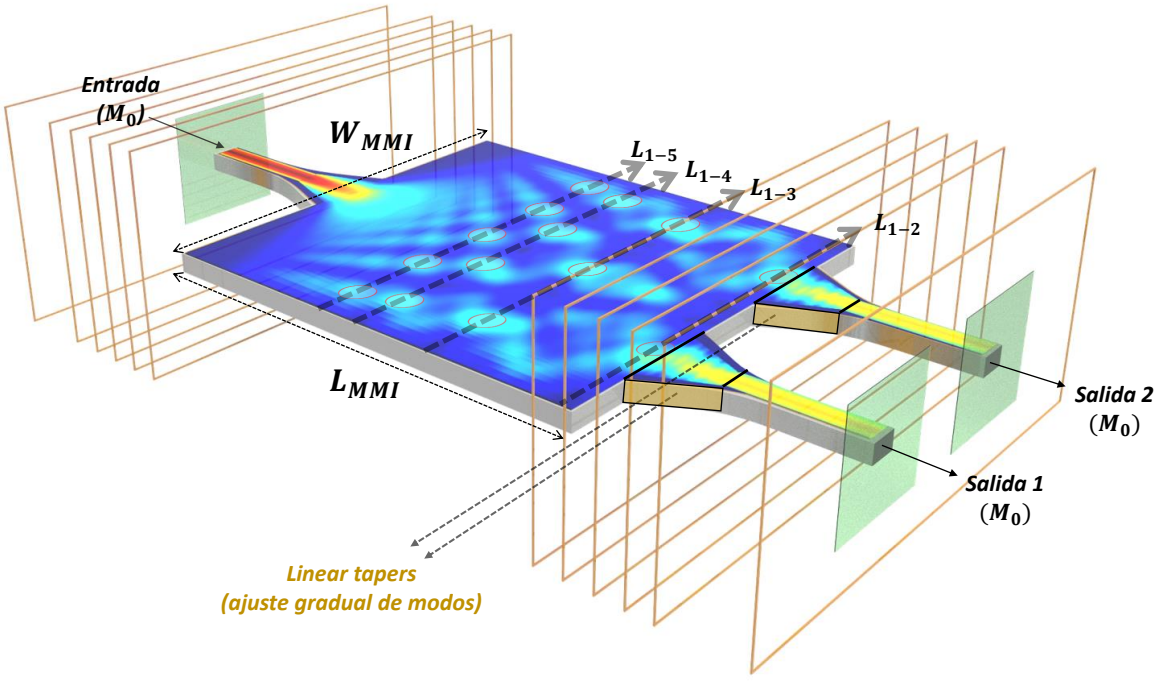


Figura 3.11: Esquema y parámetros relevantes de un Interferómetro Multimodal actuando como un splitter 1x2.

El interferómetro multimodal - MMI es ampliamente utilizado en circuitos integrados fotónicos (PICs) para dividir y combinar luz. El funcionamiento de un

dispositivo MMI se basa en el principio de autoimagen [29] [30]. La autoimagen es una propiedad de la guía de ondas multimodo mediante la cual un perfil de campo de entrada se reproduce en imágenes únicas o múltiples a intervalos periódicos a lo largo de la dirección de propagación de la guía de onda. La longitud de una región MMI rectangular es usualmente $L_{MMI} = p \cdot (3L_\pi)$, donde $p = 1, 2, ...$ (para minimizar el tamaño del MMI, se elige $p = 1$), $L\pi$ es la longitud de acoplamiento de los dos modos de orden más bajo,

$$L_\pi = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} = \frac{4nW_e^2}{3\lambda} \tag{3.16}$$

donde n es el índice de refracción efectivo de la guía de onda, β_0 y β_1 son las constantes de propagación del modo 0 y el modo 1, y W_e es el ancho efectivo que tiene en cuenta la profundidad de penetración lateral (dependiente de la polarización) de cada campo del modo. Para guías de ondas de alto contraste de índice de refracción, $W_e \approx W_{MMI}$ y W_{MMI} es el ancho de la región MMI. Así podemos obtener

$$L_{MMI} = 3pL_\pi = \frac{3p\pi}{\beta_0 - \beta_1} \approx \frac{4npW_{MMI}^2}{\lambda}. \tag{3.17}$$

Esto implica que al reducir el tamaño del ancho W_{MMI}, el L_{MMI} puede reducirse significativamente. Existe otra manera de reducir aún más el tamaño del divisor MMI. Como se mencionó previamente, la longitud de la región MMI debe ser $L_{MMI} = p \cdot (3L_\pi)$ bajo condiciones de interferencia general, sin restricciones impuestas en la excitación modal. Sin embargo, al añadir restricciones de simetría y ubicación del puerto en el campo de entrada, solo algunos modos guiados en la guía de onda multimodo son excitados, lo que se conoce como condición de interferencia restringida. En esta condición, la periodicidad de la longitud de la fase del modo se reduce considerablemente. Por ejemplo, cuando se introduce un campo de entrada simétrico $\varphi(y, 0)$ (como un haz gaussiano) en la posición central, solo se excitan modos simétricos pares. Esto resulta en imágenes individuales del campo de entrada $\varphi(y, 0)$ que se obtienen ahora en

$$L = p \cdot \left(\frac{3}{4}L_\pi\right), \quad con \quad p = 1, 2, ... \tag{3.18}$$

La imagen se obtiene mediante combinaciones lineales de modos simétricos (pares), y el mecanismo se denominará interferencia simétrica. Se pueden obtener N veces imágenes [29] a las distancias:

$$L_0 = \frac{p}{N} \cdot \left(\frac{3}{4} L_\pi\right), \quad con \quad p = 1, 2, ... \tag{3.19}$$

Las imágenes del campo de entrada $\varphi(y, 0)$ están colocadas simétricamente a lo largo del eje y, separadas por el mismo intervalo WMMI/N. Los divisores ópticos de N vías pueden potencialmente diseñarse basándose en imágenes replicadas N veces, según la ecuación 3.19. Sin embargo, al excitar solo los modos simétricos pares, se pueden realizar divisores de haz de 1 hasta N, con guías de onda multimodo que son cuatro veces más cortas. [29]. En efecto, aunque no exista un intercambio de energía entre los modos, cada uno se propagan a una velocidad diferente estableciendo un patrón de interferencia a lo largo de la longitud de estructura.

El divisor/combinador de guía de onda 1×2 es posiblemente la estructura MMI más simple jamás realizada, ya que solo requiere dos modos simétricos [31]. En este contexto, exploraremos la simulación y el diseño de un MMI 1×2 ultracompacto que concede amplias tolerancias dimensionales. Comúnmente, se utiliza una sección de ajuste gradual de modos en las entradas y salidas del MMI para reducir las pérdidas intrínsecas del dispositivo, conocidas como "linear tapers", vistos en la sección 3.4.1. El objetivo es minimizar el desacoplamiento de modos, o sea que se optimiza el acoplamiento de modos entre las regiones multimodo y monomodo. Se implementaron simulaciones del tipo auto-modos (MODE) y propagador de modos (EME).

Para analizar el comportamiento de este dispositivo, en este caso, $n = 3{,}43$ (el índice de refracción del silicio), $\lambda = 1{,}55\,\mu m$. Asumiendo $W_{\text{MMI}} = 6\,\mu m$, y sustituyéndolos en la Ecuación 3.17, podemos obtener:

$$L_\pi \approx \frac{4nW_{\text{MMI}}^2}{3\lambda} = 106{,}83\,\mu m. \tag{3.20}$$

Sustituyendo la Ecuación 3.20 y $p = 1$, $N = 2$ en la Ecuación 3.19, podemos obtener un divisor MMI con 1 imagen de entrada y 2 imágenes replicadas a una distancia:

$$L_{1-2} = \frac{p}{N} \cdot \left(\frac{3}{4} L_\pi\right) = 39{,}83\,\mu m. \tag{3.21}$$

Entonces, se puede observar que para $L_{1-1} \approx 79{,}66\,\mu m$ se replica la imagen de la entrada, mientras que para $L_{1-2} \approx 39{,}83\,\mu m$ se duplica, $L_{1-3} \approx 26{,}55\,\mu m$ se triplica y $L_{1-4} \approx 19{,}91\,\mu m$ se cuadriplica la entrada. Notar que el subíndice 1-1 hace referencia a la condición de una entrada y una salida, 1-2 una entrada y dos

salidas, y así sucesivamente (ver Figura 3.11). Las longitudes en cuestión cumplen con la condición $L_{1-N} = L_{1-1}/N$, siendo N la cantidad de imágenes formadas a lo largo del interferómetro.

Dado que el ancho de la región MMI $W_{\text{MMI}} = 6\,\mu m$, la distancia entre los dos puertos de salida es $W_{\text{MMI}}/2 = 3\,\mu m$; están simétricamente ubicados en $y = \pm 1{,}5\,\mu m$. En donde "y" es la dirección de ancho del MMI y "x" es la dirección del largo del MMI, así como se aprecia en la Figura 3.12(a).

Las pérdidas pueden ser minimizadas asegurando una buena coincidencia entre los modos de las guía de entrada/salida. Además, como ya se había mencionado, para minimizar las pérdidas en la región de interferencias se implementaron *linear tapers* en las entradas/salidas del dispositivo como se muestran en las Figuras 3.11 y 3.12(a).

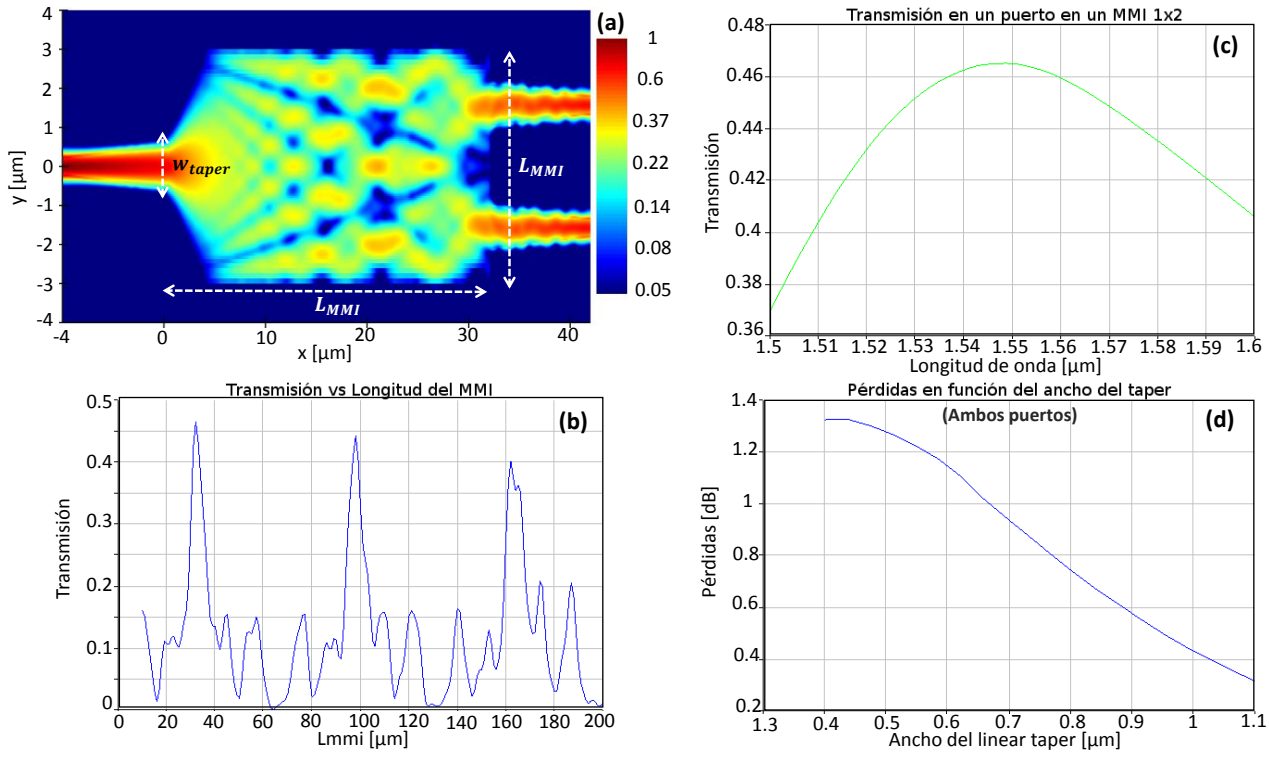


Figura 3.12: (a) Mapa de potencia normalizado del MMI 1x2. (b) Transmisión en uno de los puertos en función de L_{MMI} (c) Transmisión en función λ en uno de los puertos del MMI. (d) Optimización del ancho del *linear taper*, donde la suma de las pérdidas de ambos fue minimizada.

La figura 3.12(a) muestra la intensidad de campo eléctrico en donde se pueden apreciar las autoimagenes formadas a lo largo del dispositivo.

En la Figura 3.12(b) se observa la transmisión en función de L_{MMI} de un solo puerto, en donde se evidencia un pico máximo de transmisión en ≈ 38 μm. En

el análisis, esta fue la distancia previamente calculada en donde se formaron dos imágenes.

La Figura 3.12(c) muestra la transmisión MMI en función de la longitud de onda λ para el ancho del taper de 1,1 μm previamente obtenido.

La Figura 3.12(d) muestra la optimización del ancho del *linear taper*, tomando valores w_{taper} de 0.4 μm a 1.1μm, y se observa que en este último valor, la suma de las pérdidas de ambos puertos fueron minimizados, por lo que el ajuste gradual de modos fue adecuado.

3.4.5. Anillo resonador óptico.

Los anillos resonadores ópticos integrados en silicio son componentes clave en la fotónica integrada para filtrar, modular, o multiplexar señales ópticas. Es una estructura donde una guía de onda en forma de anillo se le acopla luz desde una guía de onda recta. La luz que entra en la guía de onda recta puede acoplarse al anillo y resonar dentro de él. El acoplamiento normalmente consta de uno o dos acopladores direccionales como los vistos en 3.4.2. Por lo tanto, hay dos configuraciones de resonador de anillo, es decir, *all-pass* y *add-drop*.

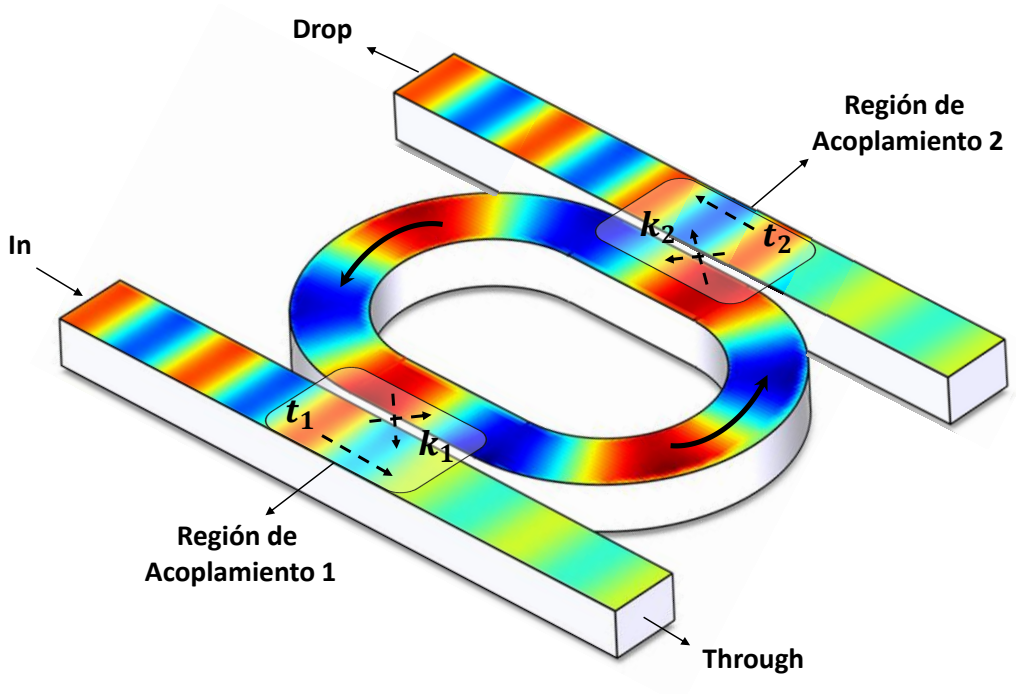


Figura 3.13: Esquema de un anillo resonador *Add-Drop* y sus parámetros.

La cavidad del resonador de anillo puede tener forma de pista de carreras, y consta de dos guías de ondas semi-circulares unidas y dos guías de ondas rectas (para acopladores direccionales). Para más detalles de los anillos resonadores, se puede consultar en [32].

Función de transferencia óptica.

La longitud del anillo está dada por:

$$L_{rt} = 2\pi r + 2L_c \tag{3.22}$$

donde r y L_c son el radio de curvatura y la longitud del acoplador, respectivamente. Cuando $L_c = 0$, el micro-anillo está acoplado en un punto y la cavidad se convierte en un círculo.

La respuesta del puerto *through* de un micro anillo resonador *all-pass* (un solo bus), está dada por:

$$\frac{E_{thru}}{E_{in}} = \frac{-\sqrt{A} + te^{-i\phi_{rt}}}{-\sqrt{A}^* + e^{-i\phi_{rt}}} \tag{3.23}$$

donde t es el coeficiente de acoplamiento de paso directo del campo óptico; $*$ es el complejo conjugado; ϕ_{rt} y A son la fase óptica de ida y vuelta y la atenuación de potencia, respectivamente, y están dados por:

$$\phi_{rt} = \beta L_{rt} \tag{3.24}$$

$$A = e^{-\alpha L_{rt}} \tag{3.25}$$

Tenga en cuenta que en este modelo, la fase acumulada por la luz que se propaga en el acoplador está incluida en la fase total de ida y vuelta, ϕ_{rt}; t y k son conocidos como los coeficientes de acoplamiento de punto y no hay un cambio de fase en el acoplamiento del puerto *through*, t.

El filtro *add-drop*, mostrado en la Figura 3.13, tiene dos salidas, es decir, la señal del puerto de paso, E_{thru}, y la señal del puerto de caída, E_{drop}, que se expresan como:

$$\frac{E_{\text{thru}}}{E_{\text{in}}} = \frac{t_1 - t_2^*\sqrt{A}e^{i\phi_{\text{rt}}}}{1 - \sqrt{A}t_1 t_2^* e^{i\phi_{\text{rt}}}} \tag{3.26}$$

$$\frac{E_{\text{drop}}}{E_{\text{in}}} = \frac{-k_1^* k_2\sqrt{A}e^{i\phi_{\text{rt}}/2}}{1 - \sqrt{A}t_1 t_2^* e^{i\phi_{\text{rt}}}} \tag{3.27}$$

donde t_1, κ_1, t_2 y κ_2 son los coeficientes de acoplamiento directo y cruzado de los acopladores de entrada (*input*) y de caída (*drop*), respectivamente, que

normalmente son idénticos para un diseño simétrico, es decir, $t_1 = t_2 = t$ y $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa$. Suponiendo acopladores sin pérdidas (es decir, las pérdidas ópticas de los acopladores se incorporan a la pérdida de ida y vuelta de toda la cavidad óptica), t y κ tienen la relación

$$|\kappa|^2 + |t|^2 = 1 \tag{3.28}$$

Entonces, el modo de la cavidad se excita mediante un acoplamiento evanescente entre guías de ondas ópticas estrechamente espaciadas. Las principales características que definen al anillo resonador son: la longitud promedio (efectiva) del anillo L, la constante de propagación compleja β del modo circulante, los coeficientes de transmisión de campo del acoplador de guía de ondas t_{11} y t_{12}, y la pérdida por curvatura.

La parte real de la constante de propagación β es la fase. La pérdida total del anillo se debe a la parte imaginaria de β, como la pérdida por curvaturas y otras pérdidas como la dispersión en la región de acoplamiento. Para las guías de ondas de alto índice de contraste que estamos considerando, en longitudes de onda de alrededor de 1550 nm, la pérdida de propagación y la pérdida por curvatura son pequeñas. Para este análisis ignoraremos todas las pérdidas, pero las diferentes contribuciones a las pérdidas podrían considerarse fácilmente en un análisis más detallado.

Para el caso de los anillos resonadores acoplados a dos guías de ondas ópticas (dos buses), la potencia óptica *drop* se puede expresar como:

$$P_D = P_{IN}\frac{|t_{12}|^4}{|1 - t_{11}^2 e^{i\beta L}|^2} \tag{3.29}$$

En resonancia, la fase adquirida por la onda después de un viaje de ida y vuelta completo es un múltiplo entero de 2π, es decir, $\beta L = 2\pi$N, con N como el número de modo. Si el índice de refracción efectivo es independiente de la longitud de onda, entonces la longitud del anillo (o perímetro) es un múltiplo entero de la longitud de onda efectiva en resonancia, o $L = N\lambda_0/n_{eff}$, donde el índice de refracción efectivo se define como $n_{eff} = c\beta/\omega$ y $\lambda_0 = c/f_0$ es la longitud de onda del espacio libre a la frecuencia de resonancia f_0. En realidad, el índice efectivo si depende de la longitud de onda y las resonancias están separadas por el rango espectral libre (FSR) que, en unidades de longitud de onda viene dado por;

$$FSR = \frac{\lambda^2}{n_g L} \tag{3.30}$$

donde $n_g = c(d\beta/d\omega)$ es el índice del grupo.

Como la pérdida por curvaturas es baja para guías de onda de índice alto y estamos ignorando otras fuentes de pérdidas, el factor Q puede expresarse por la siguiente expresión:

$$Q = \frac{\lambda}{2\delta\lambda} = \frac{n_g L\pi}{\lambda} = \frac{|t_{11}|}{1-|t_{11}|^2} \tag{3.31}$$

Entonces, para mostrar un diseño rápido con las expresiones ingresadas anteriormente, usamos un anillo resonador para sistemas WDM con un espacio de canal de 200 Ghz (1.6 nm a λ=1550 nm). Y queremos que el sistema tenga un drop cada 16 canales. Entonces el FSR debe ser de 3200 GHz (25.6nm a λ=1550 nm). La guía de onda tiene un ancho de 400 nm y altura de 180 nm. Se desea que el ancho de banda total a la mitad de la máxima potencia (*Full Width at Half Maximun*-FWHM), en el puerto *drop* sea de 100 GHz (0.8 nm), lo cual se calcula como la relación entre la longitud de onda central (1550 nm) y el ancho de banda en términos de longitud de onda (0.8 nm), entonces $Q \approx 1550$ nm$/0.8$ nm ≈ 2000.

El rango espectral libre (FSR) y el factor de calidad (factor Q), son métricas de rendimiento clave para este diseño de guía de ondas basado en silicio sobre aislante (SOI) destinado a aplicaciones de comunicación en chip. El factor de calidad es una medida de cuán "selectivo" es el filtro. Un Q alto se refiere a que el ancho de banda de la resonancia es muy pequeño en relación a la frecuencia central (o longitud de onda) del resonador, por lo tanto el filtro con Q alto puede seleccionar una banda muy estrecha.

Modos simétricos y anti-simétricos.

En sistemas de guías de onda acopladas, los modos simétricos y anti-simétricos se definen en función de la distribución espacial del campo eléctrico (o magnético) en las dos guías y cómo éste se comporta respecto al plano de simetría que corta el sistema por la mitad.

Modo simétrico: En este modo, el campo (por ejemplo, el campo eléctrico) tiene la misma fase y amplitud en ambas guías. La distribución del campo es simétrica respecto al plano de simetría, lo que significa que al reflejar el campo a través de este plano se obtiene la misma distribución. Estos modos tienden a concentrar más energía en la región central entre las guías.

Modo anti-simétrico: En este modo, el campo tiene una diferencia de fase de π (es decir, están en oposición de fase) entre las dos guías. La distribución del campo es antisimétrica respecto al plano de simetría; al reflejar el campo a través de dicho

plano, se invierte la señal (cambio de signo). Esto resulta en una distribución en la que el campo se cancela en el plano de simetría y se concentra en las regiones exteriores de las guías.

Diseño del anillo resonador Add-Drop.

Primero usamos *Lumerical Mode Solutions* para encontrar los auto-modos en la sección transversal de la guía de onda, esto nos permite encontrar el índice del grupo $n_g = 4{,}63$ para una banda de 1500 nm a 1600 nm. Con el índice del grupo, podemos calcular fácilmente la longitud total del anillo deseada:

$$L = \frac{c}{n_g FSR} \approx 20{,}2\mu m \tag{3.32}$$

El diseño del anillo requiere un factor de calidad Q de 1.55nm/0.8nm $\approx$ 2000. Podemos resolver la amplitud de t para una Q dada:

$$|t_{11}| = \sqrt{(\frac{n_g L\pi)^2}{2Q\lambda} + 1} - \frac{n_g L\pi}{2Q\lambda} \tag{3.33}$$

Donde el índice del grupo n_g, el largo del anillo L y la longitud de onda central λ son conocidas, podemos computar $t_{11} \approx 0.95$ y luego podemos encontrar $t_{12} \approx 0.31$.

Utilizamos una vez más *Lumerical Mode Solutions* para calcular el índice del sistema para las guía de ondas acopladas. Sabemos que la longitud del acoplamiento se puede determinar a partir de la diferencia en el índice efectivo de los modos acoplados simétricos y anti-simétricos mediante la fórmula:

$$L_{coupler} = \frac{\lambda}{\pi\Delta n} sin^{-1}(|t_{12}|) \tag{3.34}$$

Usamos un gap entre el anillo y el bus de 100nm, y computamos que Δn= 0.109 a λ=1550 nm. El resultado obtenido es una longitud de acoplamiento de $\approx$ 1427 nm. Pero en este caso usaremos una longitud de acoplamiento $\approx$ 0 y así obtendremos suficiente acoplamiento desde la sección curva del anillo en las cercanías de la guía de onda del bus.

El radio lo podemos elegir de tal manera que tengamos la longitud de acoplamiento deseada y la longitud total del anillo deseada. Para terminar de modelar el micro-anillo, entonces vamos a elegir un radio = 3.1 μm. En la Figura 3.14 se muestran los resultados de las simulaciones, las cuales pueden ser implementadas

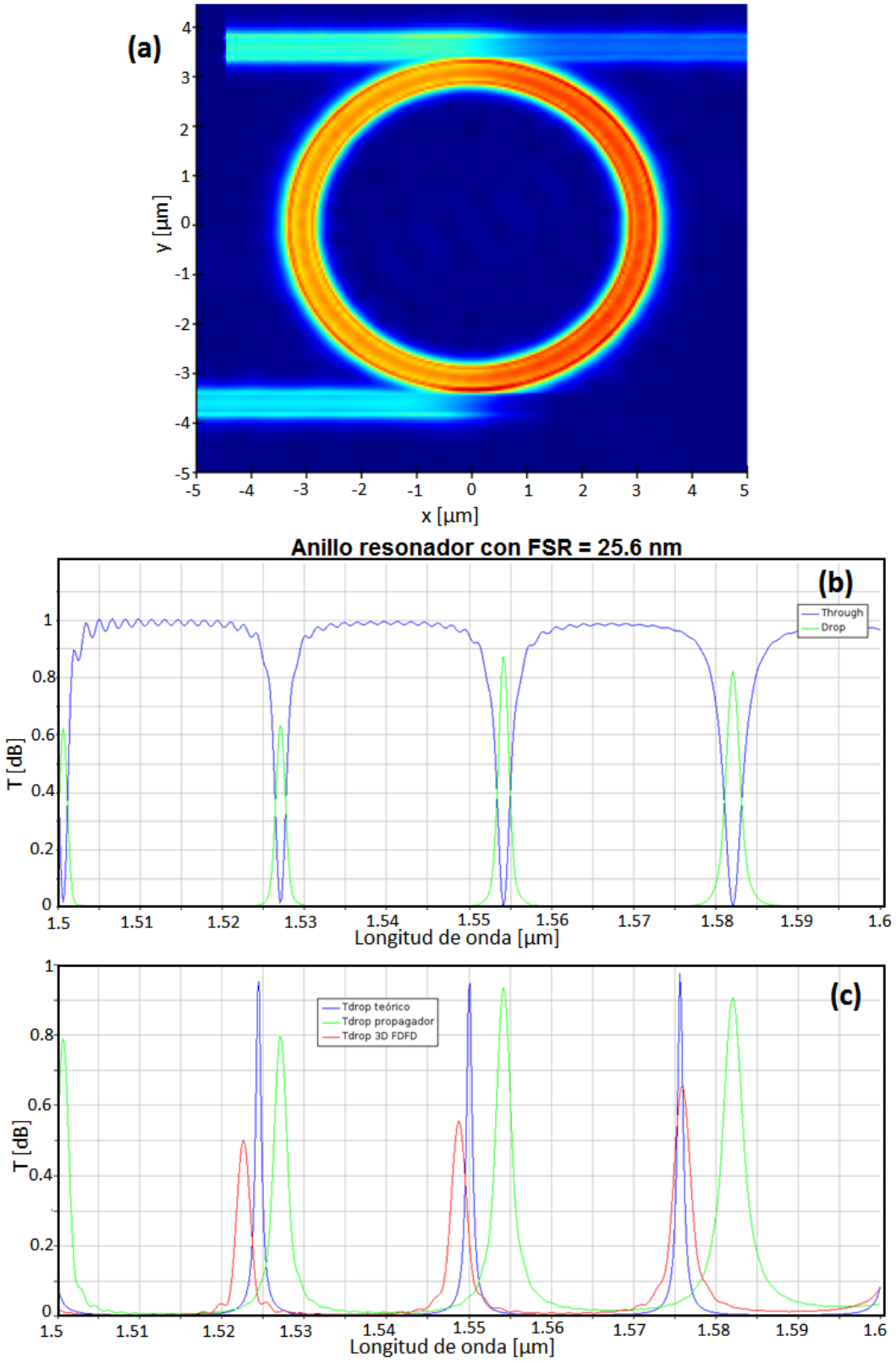


Figura 3.14: (a) Campo E a largo del anillo resonador mediante simulaciones FDTD. (b) Respuesta espectral de los puertos *through* y *drop* en el anillo. (c) Comparación de resultados usando el método aproximado 2.5 FDTD (verde), método teórico (azul) y 3D FDTD (rojo).

mediante el método 2.5 FDTD (*Lumerical Mode Solutions*) para un rápido modelado y 3D FDTD (*Lumerical FDTD*) para resultados más realistas y obtención de Parámetros-S, que pueden ser implementados en *Lumerical Interconnect* para combinar la respuesta del anillo en un sistema más amplio con otros dispositivos.

Los resultados de la figura 3.14(c) concuerdan razonablemente con el FSR teórico (línea azul), pero se puede observar que el factor Q es incorrecto. Esto es debido a que hemos ignorado todas las fuentes de pérdidas en el cálculo de la curva teórica, y además porque no alcanzamos exactamente el valor deseado de t_{12}. La simulación 3D FDTD (roja) muestra una transmisión total más baja porque considera más fuentes de pérdida.

Se han ajustado los picos teóricos para dar un máximo a 1550 nm. La posición precisa de este pico es muy sensible a la longitud óptica exacta del anillo, y a los procesos de fabricación.

3.4.6. Redes de Bragg.

Las redes de Bragg, son un componente fundamental para lograr funciones selectivas de longitud de onda, se ha utilizado en numerosos dispositivos ópticos como láseres semiconductores y fibras. En los últimos años, la integración de redes de Bragg en guías de ondas de silicio ha atraído un creciente interés en la investigación. En esta sección, se describe la teoría de las redes, partiendo de la red de Bragg uniforme, y una metodología de modelado y diseño de estas estructuras.

Teoría.

En la configuración más simple, una red de Bragg es una estructura con una modulación periódica del índice de refracción efectivo en la dirección de propagación del modo óptico, como se muestra en la Figura 3.15. Esta modulación se logra comúnmente variando el índice de refracción (por ejemplo, alternando material) o las dimensiones físicas de la guía de ondas. En cada límite se produce una reflexión de la luz viajera y la fase relativa de la señal reflejada está determinada por el período de la red y la longitud de onda de la luz. La modulación repetida del índice efectivo da como resultado reflexiones múltiples y distribuidas. Las señales reflejadas sólo interfieren constructivamente en una banda estrecha alrededor de una longitud de onda determinada, denominada la "longitud de onda de Bragg". Dentro de este rango, la luz se refleja fuertemente. En otras longitudes de onda, las múltiples reflexiones interfieren destructivamente y se anulan entre sí y, como resultado, la luz se transmite a través de la red.

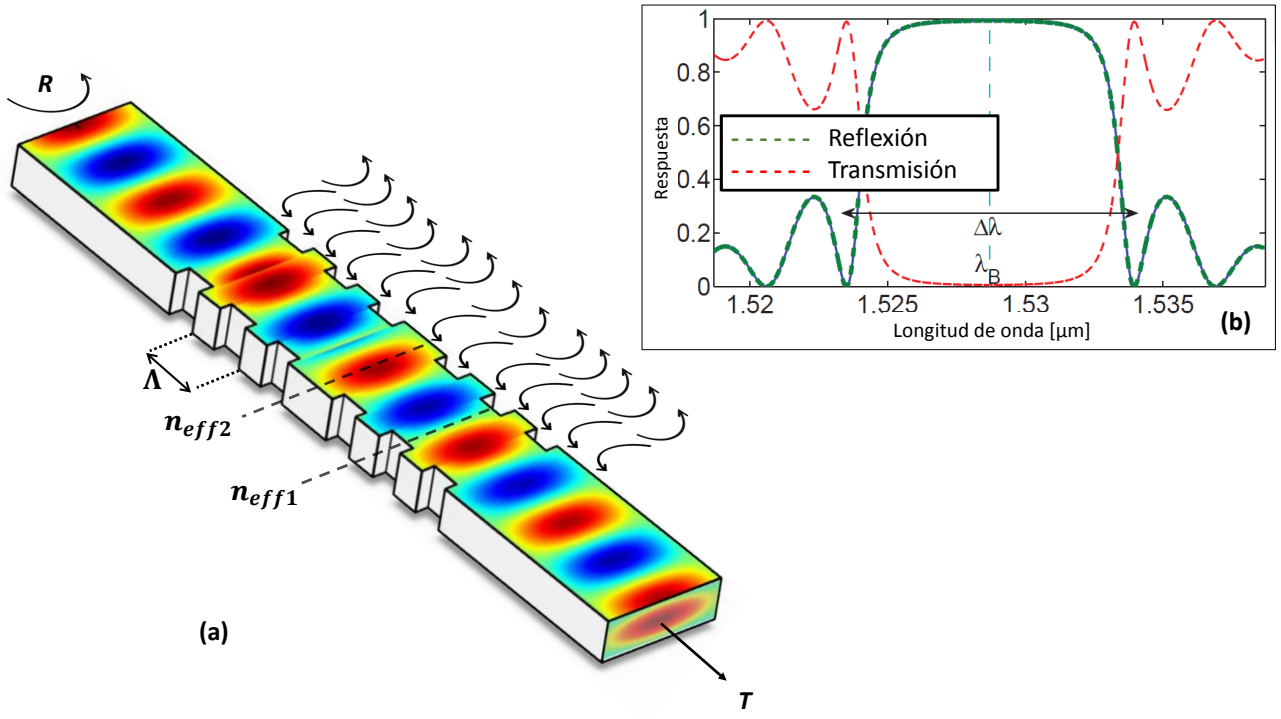


Figura 3.15: (a) Esquema de una red de bragg uniforme, en donde n_{eff1} y n_{eff2} son los índices efectivos de las secciones de índice bajo y alto, respectivamente, Λ es el periodo de la red, R y T es la reflexión y transmisión de la red. Los flechas de 180° indican las numerosas reflexiones a través de la red. (b) Respuesta espectral típica de una red de bragg uniforme.

La Figura 3.15(b) muestra la transmisión espectral típica y la respuesta de reflexión de una red de Bragg uniforme. El espectro se puede calcular utilizando las ecuaciones analíticas que siguen, basadas en la teoría del modo acoplado (CMT) o mediante herramientas numéricas usando el Método de la Matriz de Transferencia (TMM), la clave es determinar correctamente el coeficiente de acoplamiento de la red.

La longitud de onda central, que es 1529 nm en la Figura 3.15(b) se conoce como la longitud de onda de Bragg, y se da por:

$$\lambda_B = 2\Lambda n_{\text{eff}}, \tag{3.35}$$

donde Λ es el periodo de la red y n_{eff} es el índice efectivo promedio. Basado en la Teoría de Modo Acoplado [33], el coeficiente de reflexión para una red uniforme con longitud L se describe por:

$$r = \frac{-i\kappa \sinh(\gamma L)}{\gamma \cosh(\gamma L) + i\Delta\beta \sinh(\gamma L)} \tag{3.36}$$

con

$$\gamma^2 = \kappa^2 - (\Delta\beta)^2. \tag{3.37}$$

Aquí, $\Delta\beta$ es el desplazamiento de la constante de propagación desde la longitud de onda de Bragg:

$$\Delta\beta = \beta - \beta_0 \ll \kappa \tag{3.38}$$

y κ se define a menudo como el coeficiente de acoplamiento de la red y se puede interpretar como la cantidad de reflexión por unidad de longitud.

En el caso donde $\Delta\beta = 0$, la Ecuación 3.36 se escribe como $r = -\tanh(\kappa L)$, por lo tanto, la reflectividad de pico a la longitud de onda de Bragg es:

$$R_{\text{peak}} = \tanh^2(\kappa L). \tag{3.39}$$

El ancho de banda es también un importante criterio de mérito para las redes de Bragg. El ancho de banda entre el primer cero y la resonancia se puede determinar por [33]:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_B}{n_g} \frac{\kappa}{\sqrt{\kappa^2 + (\pi/L)^2}}, \quad (4{,}33) \tag{3.40}$$

donde n_g es el índice de grupo. Se debe notar que esto es mayor que el ancho de banda de 3 dB.

Para redes largas, es decir, $\kappa \gg \pi/L$, la expresión se puede simplificar a:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_B}{n_g} \frac{\pi}{L}. \tag{3.41}$$

Ahora, es importante observar el ejemplo de la Figura 3.15(b), este representa a una red relativamente corta, por lo tanto el ancho de banda es mayor que el predicho por la aproximación en la Ecuación 3.41; en su lugar, debe usarse la Ecuación 3.40.

Para tener en cuenta las pérdidas de propagación óptica, las ecuaciones anteriores se modifican reemplazando $\Delta\beta$ por $\Delta\beta - i\alpha/2$, donde α es el coeficiente de pérdida de intensidad que se define a continuación.

La pérdida de una guía de onda se expresa típicamente en dB/cm, pero se puede convertir a un coeficiente de absorción, en $[m^{-1}]$:

$$\alpha[m^{-1}] = \frac{\alpha[dB/m]}{10\log_{10}(e)} = \frac{\alpha[dB/m]}{4{,}34} \tag{3.42}$$

Coeficiente de acoplamiento de la red

La tarea clave en el diseño de las redes de Bragg es determinar el parámetro del coeficiente de acoplamiento de la red, lo que se puede hacer mediante varios métodos: (1) métodos perturbativos (CMT), (2) basados en reflexiones, (3) basados en coeficientes de reflexión encontrados usando las ecuaciones de Fresnel y "aproximación de onda plana", (4) basados en simulaciones 3D de la red, usando FDTD o EME, (5) simulaciones 3D con incorporación de suavizado de fabricación ya sea con imágenes SEM o por litografía computacional, o (6) basados en datos experimentales.

Aquí, discutimos el enfoque mediante el cual los coeficientes de reflexión se encuentran basados en las ecuaciones de Fresnel. Para una variación efectiva del índice de paso mostrada en la Figura 3.15(a),

$$\Delta n = n_{\text{eff1}} - n_{\text{eff1}}. \tag{3.43}$$

la reflexión en cada interfaz se puede escribir como $\Delta n/2n_{\text{eff}}$ de acuerdo con las ecuaciones de Fresnel. Cada período de la red contribuye con dos reflexiones, por lo tanto, el coeficiente de acoplamiento es:

$$\kappa = 2\frac{\Delta n}{2n_{\text{eff}}\Lambda} = \frac{2\Delta n}{\lambda_B}. \tag{3.44}$$

Este coeficiente de acoplamiento es para el caso de un perfil rectangular de la red. Se pueden encontrar ecuaciones similares, por ejemplo, para variaciones sinusoidales del índice efectivo [33]. Si se sabe que una red fabricada es sinusoidal,

$$\kappa_{\text{sinusoidal}} = \frac{\pi\Delta n}{2\Lambda}. \tag{3.45}$$

Pero para las aplicaciones vistas en esta tesis doctoral, nos enfocamos en el perfil rectangular de la red, con la Ecuación 3.44.

Diseño.

Se va describir brevemente un método numérico que es muy utilizado para simular la respuesta del perfil de una red arbitraria, para más detalles ver [34].

Método de la matriz de transferencia, TMM:

- (1) Calcular los coeficientes de reflexión y transmisión debido a discontinuidades de índice y coeficientes de propagación para secciones de guía de ondas.

- Expresar estos bloques de construcción como matrices, con un tamaño de 2 × 2 en el caso de un sistema monomodo.
- Multiplicar las matrices como una red en cascada, para representar la red.
- Extraer los valores de transmisión y reflexión de la red general. El cálculo se repite para cada longitud de onda.

La matriz de transferencia se define como:

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 \\ B_2 \end{bmatrix},$$

donde los parámetros se ilustran en la Figura 3.16. El concepto de matriz de transferencia es similar y está relacionado con la matriz de parámetros de dispersión (Parámetros-S), descrita en la Sección 3.2.5.

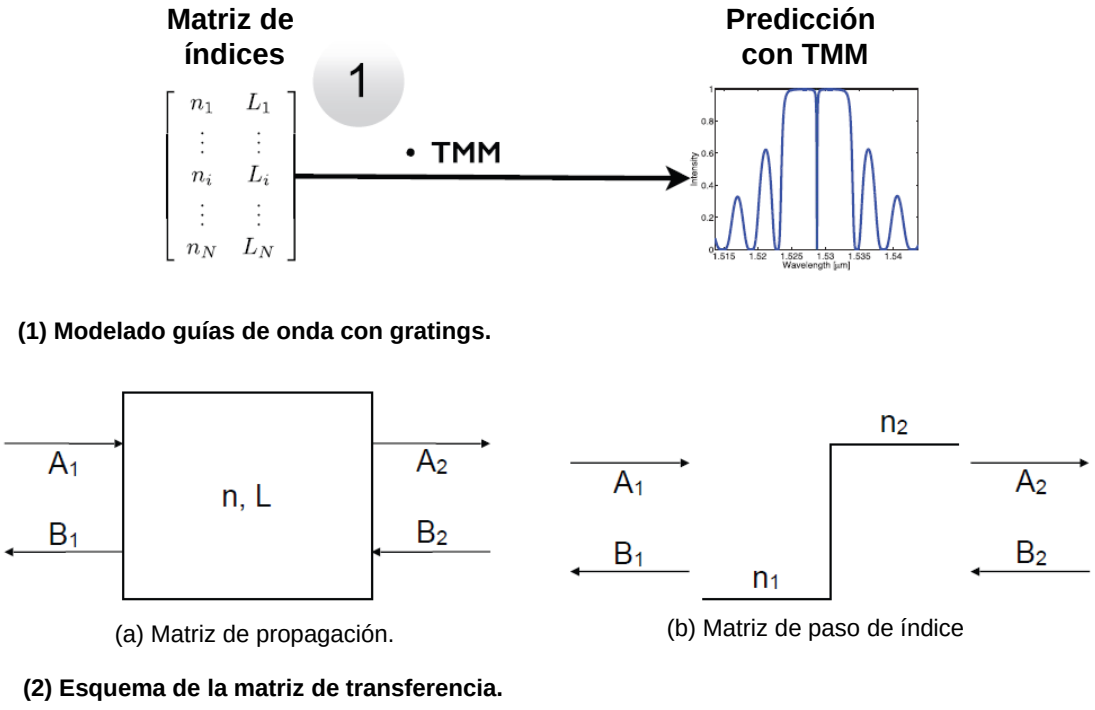


Figura 3.16: (1) Modelado de la red. (2) Esquema del método de la Matriz de Transferencia.

La matriz de transferencia para una sección homogénea de una guía de onda, como se muestra en la Figura 3.16(2a), es

$$T_{\text{hw}} = \begin{bmatrix} e^{j\beta L} & 0 \\ 0 & e^{-j\beta L} \end{bmatrix},$$

donde β es la constante de propagación compleja del campo, incluido el índice de refracción y la pérdida de propagación

$$\beta = \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda} - i\frac{\alpha}{2},$$

Donde α fue definida en la ecuación 3.42.

3.4.7. *Arrayed Waveguide Gratings* - AWG

Los multi/demultiplexores de longitud de onda son componentes clave en las redes de comunicación óptica. Durante las últimas tres décadas, han sido objeto de intensas investigaciones, ya que son dispositivos centrales para sistemas de multiplexación por división de longitud de onda (WDM)[35]. El despliegue de sistemas WDM requiere una gran cantidad de componentes, sujetos a especificaciones muy exigentes, entre ellas reproducibilidad y funcionamiento estable. Naturalmente, la mayoría de estos componentes se construyen mediante la integración fotónica.

Entre las diferentes implementaciones que requiere la multi/demultiplexación, el *Arrayed Waveguide Grating* (AWG) es un elemento que cumple todos estos requisitos [36] [37]. Además, se puede fabricar en casi todas las plataformas de materiales relevantes como *Sílice* [38], InP [39], SOI [40] o SiNx [41].

Aunque el AWG es un dispositivo muy conocido para operaciones de multi/-demultiplexación de longitudes de onda [36], 3 décadas después de su invención, han surgido una gama de nuevas aplicaciones. Por ejemplo, se ha utilizado como enrutador de longitud de onda [42] demostrando que con un AWG N×N, se puede enrutar una longitud de onda desde cualquier puerto de entrada a cualquier puerto de salida. Una de las aplicaciones novedosas más importantes es la espectrometría, donde puede proporcionar alta resolución espectral y compacidad [43] [44]. Por lo tanto, se ha utilizado como pieza clave para los sistemas de tomografía de coherencia óptica (OCT) [45], sistemas de espectroscopia Raman [46], detección biológica [47] y aplicaciones astronómicas en el NIR [48]. Por otro lado, es posible aplicar diferentes cambios de fase en los arrays de guías de onda del AWG para obtener nuevas funcionalidades, como por ejemplo el uso como receptor coherente [49].

Debido a su versatilidad no sólo como dispositivo multi/demultiplexor, sino también como elemento central en otras aplicaciones, se ha elegido el AWG para ser estudiado en esta tesis y buscar nuevas funciones en sus aplicaciones más recientes.

Principio de funcionamiento.

El AWG es un dispositivo fotónico integrado conformado por una serie de etapas que cumplen una función específica en la demultiplexación de longitudes de onda. En la figura 3.17 se muestra el diseño esquemático de un AWG.

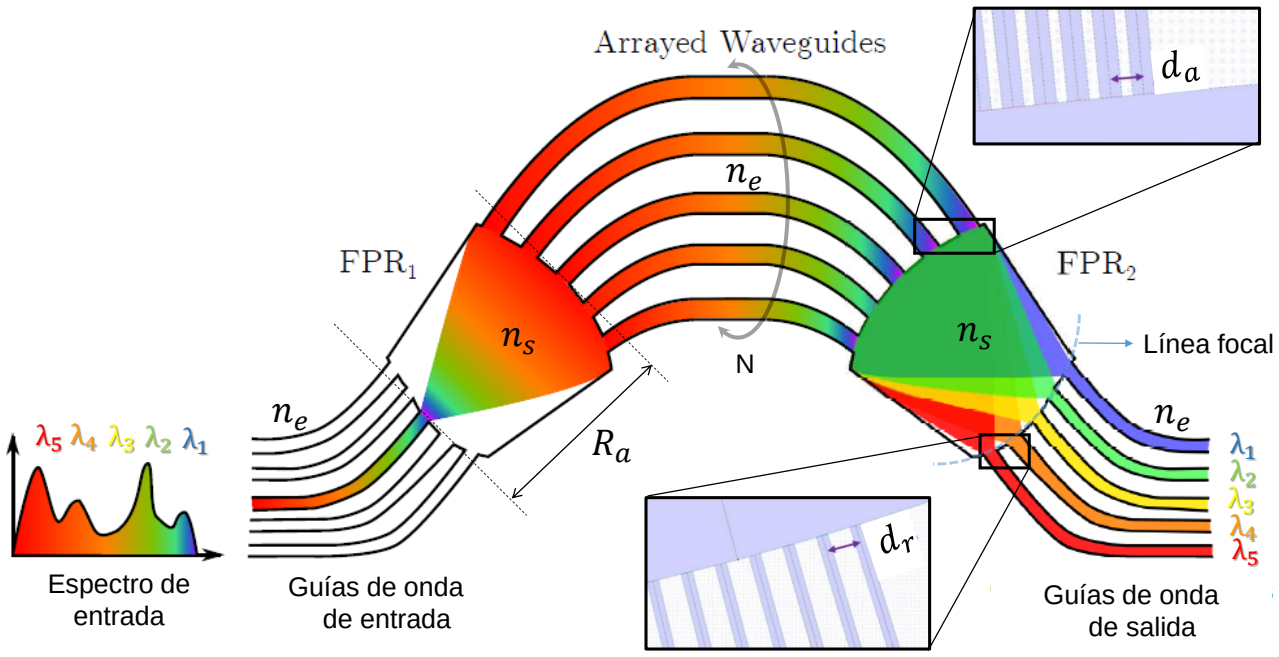


Figura 3.17: Esquema de un AWG estándar, en donde las diferentes longitudes de onda están representadas por diferentes colores. FPR significa región propagación libre, N es la cantidad de *arrays*, R_a es el diámetro de la FPR, d_a es la separación entre guías de onda del array, d_r es distancia entre canales de salida, n_s es el índice efectivo de la FPR$_{1,2}$ y n_e es el índice efectivo de las guía de onda del array y de los canales de entrada/salida. Adaptado de [50] y [51]

Por el canal de entrada ingresa la señal óptica del transmisor, el haz que se propaga por la guía de onda de entrada, ingresa a una zona de propagación libre 1 (*Free Propagation Region* - FPR$_1$) en donde el haz que viaja confinado se vuelve divergente hasta llegar a las aperturas de entrada del *array* de las guías de onda, en esta etapa la luz se acopla y se propaga a través de cada una de las guías, hasta llegar a las aperturas de salida del *array*. La longitud de las guías de ondas se elige de modo que, la diferencia de longitud de la trayectoria óptica entre las guías de ondas adyacentes (ΔL), sea igual a un múltiplo entero de la longitud de onda central (λ_c) del demultiplexor. En consecuencia, para esta longitud de onda, los campos que se propagan en cada una las guías de onda van a llegar a las aperturas de salida con la misma fase, asimismo la distribución de campo en la apertura de entrada se reproducirá en la apertura de salida. Por lo tanto el

haz divergente en la apertura de entrada se transforma así, en uno convergente con igual amplitud y distribución de fase, debido a que los múltiples haces de luz interfieren constructivamente en la FPR_2 y convergen en un solo punto focal, que es el centro del acoplador de salida.

En la Figura 3.18 podemos observar la respuesta espectral de un AWG 1x8 canales de salida, simulado con Lumerical FDTD.

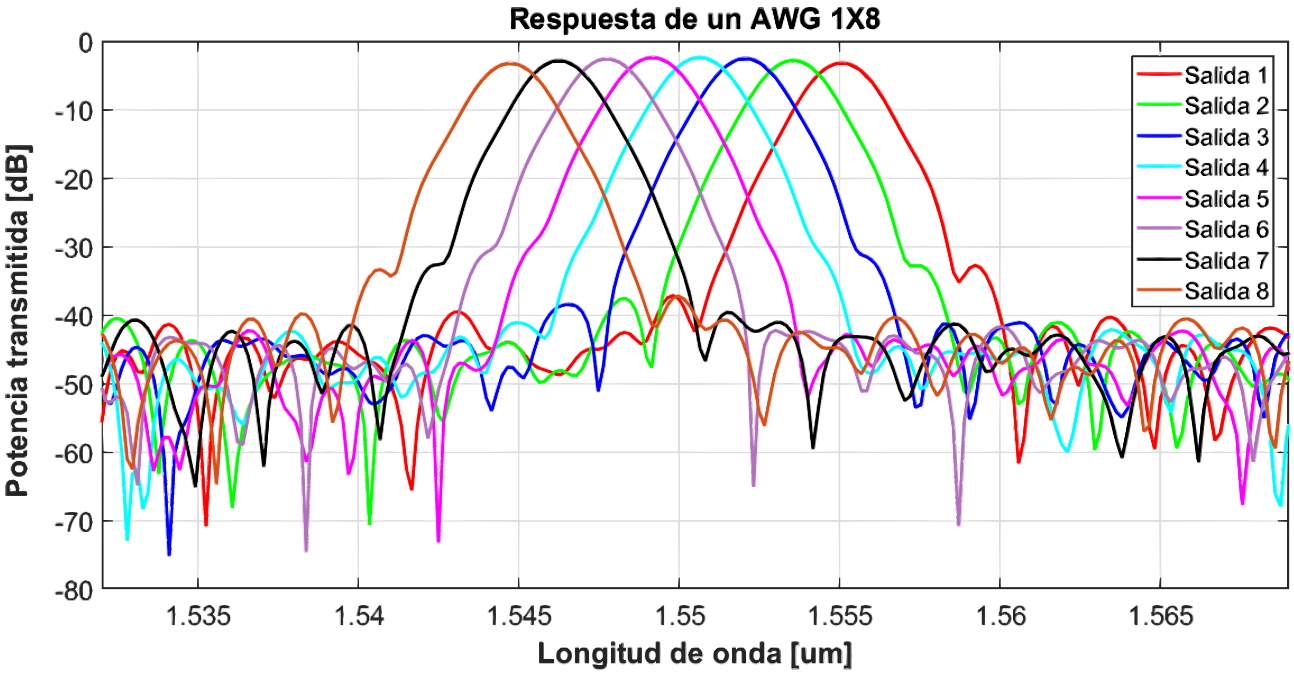


Figura 3.18: Respuesta espectral de un AWG de 1x8 canales, λ_c =1550 nm.

Una de las propiedades fundamentales del AWG es la dispersión lineal, esta se debe al aumento lineal de la longitud de cada una de las guías de onda del *array*, esto provocará que el cambio de fase inducido por un cambio en la longitud de onda varíe linealmente a lo largo de la apertura de salida del *array*. Este efecto tiene como consecuencia una inclinación del haz saliente y el punto focal se desplazará a lo largo del plano de la imagen. Finalmente, si se colocan las guías de ondas del receptor en las posiciones adecuadas a lo largo del acoplador de salida, se obtiene la separación espacial y en simultáneo de las longitudes de onda en diferentes canales.

Características de un AWG.

Los AWGs tienen una serie de características y propiedades que pueden ser diseñadas y ajustadas para obtener distintas respuestas espectrales en el proceso de separación espacial de longitudes de onda. Los ajustes que realice el diseñador de-

penderán del campo de aplicación en el cual sea insertado el AWG. A continuación se analizan sus principales características.

En primer lugar se elije ΔL, que se define como la diferencia de longitud entre las guías de ondas adyacentes del *array*, esta longitud debe ser igual a un múltiplo entero de la longitud de onda central (λ_c).

$$\Delta L = m\frac{\lambda_c}{n_e} = \frac{mc}{n_e f_c} \tag{3.46}$$

en donde m es adimensional y determina el orden del *array* en fase, f_c es la frecuencia central (también en términos de λ_c) en el vacío y n_e es el índice efectivo de la guía de onda y el modo confinado es el modo TE. Se propaga este modo debido a la combinación en el grosor del silicio, junto a la asimetría en la geometría de la sección transversal de las guías de onda (220x450 nm para SOI y 300x1500 nm para Si_3N_4), que están diseñadas para favorecer la confinación y propagación del modo TE. Con esta elección de parámetros, el *array* de guías de onda actúa como una lente con planos objetos e imagen a una distancia R_a desde las aperturas de salida hacia el acoplador de salida, donde finalmente se conectan los canales de fibra óptica. En esta primera etapa del sistema AWG, se logra el **enfoque** de salida por cada canal.

La Figura 3.19 muestra un diagrama de la región de propagación libre 2 (FPR_2). Se observan en mayor detalle las aperturas de entrada y de salida del *array* en fase, estas aperturas son ejemplos de montajes típicos del tipo círculo de Rowland [52]. La línea focal a partir de este tipo de montaje, define el plano de la imagen que sigue un círculo con radio $R_a/2$. Las guías de onda del transmisor y del receptor deben colocarse sobre esta línea para un correcto enfoque de los haces convergentes a la salida.

Dispersión y *Free Spectral Range* del AWG.

En la Figura 3.19 se puede observar el ángulo de dispersión θ resultante de la diferencia de fase $\Delta\phi$ entre las guías de onda adyacentes del *array*. El ángulo de dispersión se define como:

$$\theta = asin\left(\frac{1}{d_a}.\frac{(\Delta\phi - m2\pi)}{C_{FPR}}\right) \approx \frac{\Delta\phi - m2\pi}{d_a.C_{FPR}} \tag{3.47}$$

Donde $\Delta\phi = C\Delta L$, C y C_{FPR} son las constantes de propagación en la guía de onda y en la región de propagación libre (FPR), respectivamente.

Otra propiedad importante del AWG, es la **dispersión** que se genera desde la salida del *array* de guías de onda (ver Figura 3.20). La dispersión D se puede

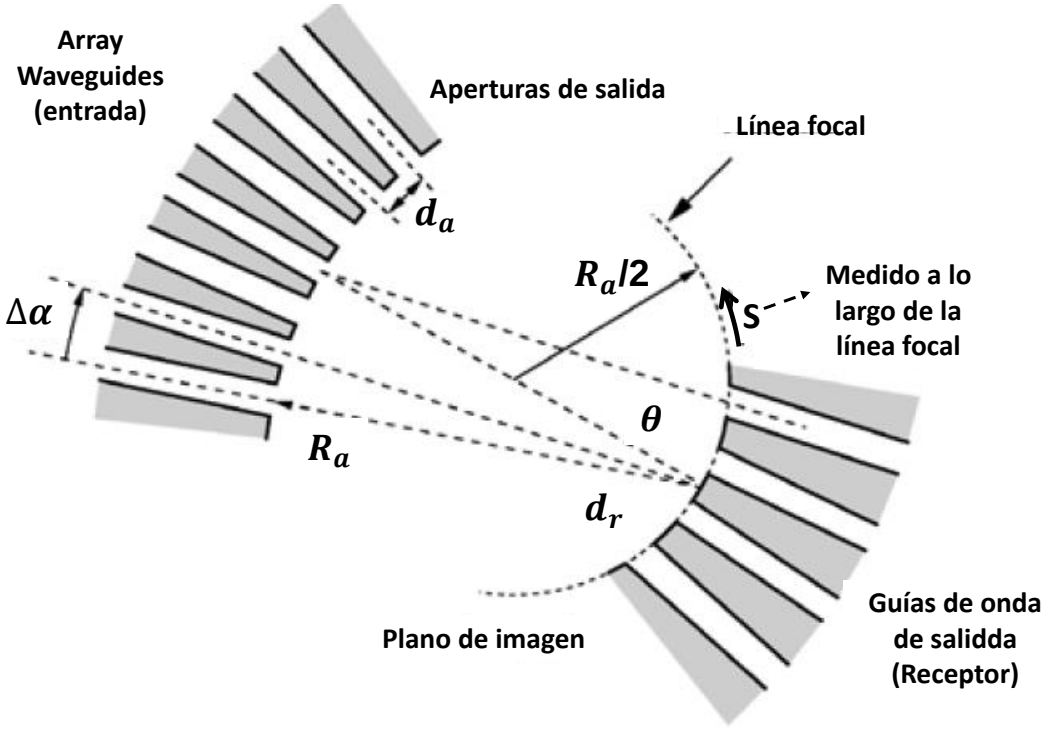


Figura 3.19: Geometría de la región de propagación libre (FPR_2) a la salida del AWG. Adaptado de Smit, 1996 [36]

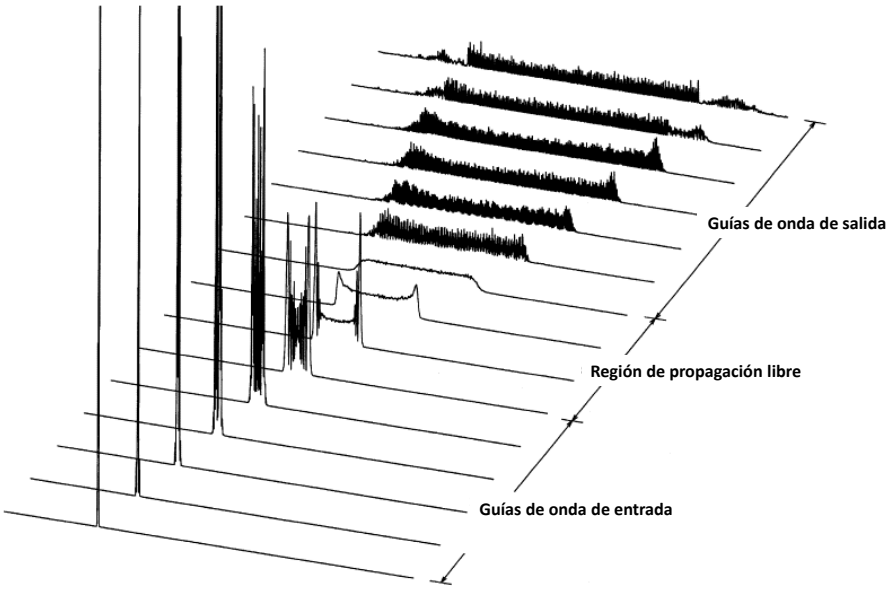


Figura 3.20: Transitorios de forma de onda de la intensidad óptica a λ= 1550 nm que va desde los *arrays* de entrada, atraviesa las región de propagación libre y finalmente llega a los *arrays* de salida. Extraído de Okamoto, 2006 [53]

describir como el desplazamiento lateral ds del punto focal a lo largo del plano

de la imagen por unidad de cambio de frecuencia (o longitud de onda):

$$D = \frac{d_s}{d_f} = R_a \frac{d\theta}{df} = \frac{1}{f_c} \frac{n_g}{n_s} \frac{\Delta L}{\Delta \alpha} \tag{3.48}$$

Donde n_g es el índice de grupo en la guía de onda, n_s es el índice efectivo en la región de propagación libre FPR, $\Delta\alpha = d_a/R_a$ es el ángulo de divergencia que se forma entre las guías de onda del *array* en las secciones de entrada y salida, d_a es el espacio que se forma entre las guías de onda (en las líneas centrales) en las aperturas de salida del *array*. Además, en la ecuación 3.48 se puede observar que la distancia R_a no se encuentra en la derecha de la expresión, por lo que a pesar de tener limitaciones en la resolución de los procesos litográficos, el relleno del espacio entre las guías de onda del *array* no afecta las propiedades dispersivas del demultiplexor.

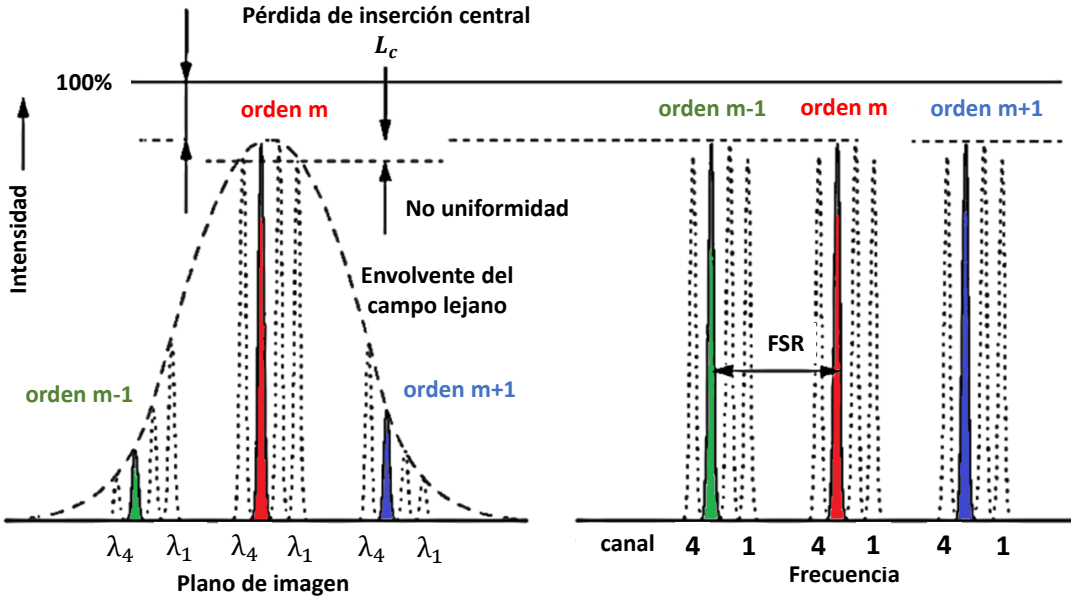


Figura 3.21: Pérdida de inserción central, no uniformidad y FSR. La línea del 100 % indica la intensidad máxima del campo de entrada.

Por otro lado, de la ecuación 3.47 se puede observar que la respuesta que presenta el *array* de guías de onda es periódica, por cada cambio de 2π en $\Delta\phi$ el campo aparecerá en la misma posición. El periodo en el dominio de la frecuencia (ver Figura 3.21) se denomina Rango Espectral Libre (*Free Spectral Range* - FSR), y se define como el cambio de frecuencia $\Delta\phi$ para el que el cambio de fase sea igual a 2π.

$$\frac{2\pi \Delta f_{\mathrm{FSR}}}{c} n_g \Delta L = 2\pi \tag{3.49}$$

De la que encontramos:

$$\Delta f_{FSR} = \frac{c}{n_g.\Delta L} = \frac{f_c}{m'} \tag{3.50}$$

Donde $m' = (n_g/n_e)\cdot m$, acomodando la ecuación anterior, se obtiene la expresión del FSR en función de la longitud de onda.

$$\Delta\lambda_{FSR} = \frac{\lambda_c^2}{n_g \cdot \Delta L} \tag{3.51}$$

De las ecuaciones planteadas, se pueden hacer dos observaciones: en la ecuación 3.47 como la relación entre θ y $\Delta\phi$ es no lineal, la ecuación 3.50 es solo una aproximación, y el FSR tendrá una pequeña variación en las salidas de los puertos del AWG.

Pérdidas por inserción y no uniformidad en los canales de salida.

En un AWG es fundamental el análisis de la no-uniformidad por canal, las pérdidas por inserción, y el ancho de banda, los mismos pueden ser estimados mediante simples ecuaciones analíticas, para esto aproximamos el campo modal del *array* de guías de onda como un haz gaussiano, también omitiendo los efectos de acoplamiento por la forma del haz. Usando la aproximación del haz gaussiano, la intensidad del campo lejano se encuentra a partir de

$$I(\theta) = I_0 \cdot e^{2\theta^2/\theta_0^2} \tag{3.52}$$

En donde θ_0 es el ancho del campo lejano gaussiano equivalente

$$\theta_0 = \frac{\lambda}{n_s} \cdot \frac{1}{w_e\sqrt{2\pi}} \tag{3.53}$$

con w_e al ancho efectivo del campo modal, lo que equivaldría al ancho de la guía de onda.

La no uniformidad L_u se define como la relación de intensidad (en dB) entre el canal exterior y el central. Usando la ecuación 3.52, las pérdidas por inserción del receptor en relación al canal central se encuentra fácilmente sustituyendo el ángulo $\theta_{max} \approx (s_{max}/R_a)$, correspondiente a las guías de onda del receptor exterior

$$L_u = -10 \cdot log(e^{2\theta_{max}^2/\theta_0^2}) \approx 8{,}7 \cdot \theta_{max}^2/\theta_0^2 \tag{3.54}$$

Eligiendo el FSR como N veces la separación del canal $\Delta\lambda$, las pérdidas por exceso L_u de los canales externos será cercana a 3 dB por razones de conservación

de energía, si consideramos un número grande de canales, la guía de onda del receptor 1 y del receptor $N+1$ van a experimentar aproximadamente la misma pérdida, cada receptor entonces tendrá un exceso de pérdida de al menos 3dB respecto del canal central. Por otro lado, para valores pequeños de N la situación puede mejorar un poco. Minimizando L_u se logra aumentar el FSR.

La pérdida de inserción L_o del canal central está determinada principalmente por la difracción de la luz en órdenes no deseadas. Los órdenes adyacentes del punto focal principal llevarán una fracción de $e^{-2\Delta\theta_{FSR}^2/\theta_0^2}$, en donde $\Delta\theta_{FSR}$:

$$\Delta\theta_{FSR} = \frac{\Delta s_{FSR}}{R_a} = \frac{D}{R_a} \cdot \Delta f_{FSR} \tag{3.55}$$

Si no consideramos la potencia acoplada en otros órdenes, la pérdida total se puede estimar como:

$$\begin{aligned} L_o &\approx -10 \cdot log(1 - 4 \cdot e^{-2\Delta\theta_{FSR}^2/\theta_0^2}) + L_p \\ &\approx 17 \cdot e^{-4\pi w_e^2/d_a^2} + L_p \end{aligned} \tag{3.56}$$

En donde asumimos que $e^{-2\Delta\theta_{FSR}^2/\theta_0^2} \ll 1$. El término L_p denota la pérdida de propagación total en el *array* y en las regiones de propagación libre 1 y 2 debido a la absorción y la dispersión. El factor 4 se debe al hecho de que la potencia se pierde en dos órdenes y se producen pérdidas significativas e iguales (debido a la reciprocidad) tanto en el lado de entrada como en el de salida del *array* de las guías de onda.

Ancho de banda.

Si se cambia la longitud de onda, el campo focal del AWG se mueve a lo largo de las guías de onda del receptor. La respuesta en frecuencia de los diferentes canales resulta de la superposición de este campo con los campos modales de las guías de ondas del receptor. Si asumimos que el campo focal es una buena réplica del campo modal en la entrada y que las guías de onda de entrada y salida son idénticas, la transmisión (logarítmica) $T(\Delta f)$ alrededor del canal máximo $T(f_c)$, es como la superposición del campo modal consigo mismo, desplazado a una distancia $\Delta s(\Delta f) = D\Delta f$

$$T(\Delta f) = T(f_c) + 20\log \int_{-\infty}^{+\infty} U(s)U(s - D\Delta f)\, ds \tag{3.57}$$

en el que $U(s)$ es el campo modal normalizado, D es la dispersión definida en 3.48 y $T(f_c)$ es la transmisión en dB en el máximo canal. Para valores pequeños

de Δs (menores que el ancho modal efectivo w_e), la integral de superposición se puede evaluar analíticamente aproximando los campos modales como campos gaussianos

$$T(\Delta f) - T(f_c) = 20 \log \left(e^{-\frac{D\Delta f^2}{w_0^2}} \right) \approx -6{,}8 \cdot \left(\frac{D\Delta f}{w_e} \right)^2 \tag{3.58}$$

El Δf_L del ancho de banda de L-dB es el doble del valor de Δf para el cual:

$$T(\Delta f) - T(f_c) = L \text{ dB} \tag{3.59}$$

$$\Delta f_L = 0{,}77 \frac{w_e}{D} \sqrt{L} = 0{,}77 \frac{w_e}{d_r} \Delta f_{\text{ch}} \sqrt{L}. \tag{3.60}$$

Esta última identidad se sigue por sustitución de $D = d_r / \Delta f_{ch}$. Si sustituimos $w_e/d_r \approx 0{,}4$ como valor representativo (crosstalk debido a la separación entre receptores < -40 dB), se encuentra que el ancho de banda de 1-dB es $0,31 \cdot \Delta f_{ch}$. Por lo tanto, para una separación entre canales de 100 GHz encontramos un ancho de banda de 1-dB de 31 GHz. La referencia a un ancho de banda de 1-dB se refiere al rango de frecuencias donde la pérdida de inserción no supera 1 dB en relación con el máximo de transmisión.

Diafonía en los AWGs (*Crosstalk*).

Una de las características más importantes del dispositivo es el *crosstalk* entre canales. Es la contribución de señales no deseadas, por ejemplo, en el caso de canales adyacentes, la contribución de la señal no deseada a la frecuencia f_{i+1} al canal detectado f_i. El *crosstalk* teórico entre canales adyacentes A_c, se deriva de la superposición del campo focal del modo deseado con el modo no deseado como:

$$A_c = \eta(d) \tag{3.61}$$

$\eta(d)$ describe cómo la intensidad del campo focal del modo no deseado disminuye a medida que aumenta la distancia d entre las guías de onda adyacentes receptoras. De esta fórmula se deduce que es posible una atenuación arbitrariamente grande del *crosstalk* al posicionar las guías de onda receptoras suficientemente separadas. Usualmente, una separación de 1 o 2 veces el ancho de la guía de onda es suficiente para obtener más de 40 dB de atenuación del *crosstalk* entre canales adyacentes. Sin embargo, en la práctica, otros mecanismos parecen limitar la atenuación del *crosstalk*. Los más importantes son los errores en la transferencia de fase de las guías de onda en el *array*. Estos se deben a no uniformidades en el

espesor de las capas, el ancho de la guía de onda y el índice de refracción y causan un "suelo del *crosstalk*ruidoso, que es inferior a 35 dB para buenos dispositivos. Los dispositivos basados en semiconductores exhiben *crosstalk* significativamente inferiores en comparación con los basados en *sílice*.

V-paremeter.

Ahora se introduce una métrica importante para el diseño y análisis de guías de onda. El *V-parameter*, también conocido como parámetro de normalización, es un número adimensional que caracteriza la propagación de modos en una guía de onda [23]. Para una guía de onda de sección transversal rectangular, el *V-parameter* lateral (Que se refiere a la dirección horizontal o lateral), se define como:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot w \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \tag{3.62}$$

Donde:

- λ es la longitud de onda.
- w es el ancho de la guía de onda.
- n_1 es el índice de refracción del núcleo de la guía de onda.
- n_2 es el índice de refracción del revestimiento (*cladding*) de la guía de onda.

El *V-parameter* lateral es importante para entender y minimizar el *crosstalk* entre canales adyacentes en dispositivos AWG. Un valor más alto del *V-parameter* generalmente indica que la guía de onda puede soportar más modos, lo que puede afectar el confinamiento del modo fundamental y, por lo tanto, el *crosstalk*.

Las cifras de *crosstalk* proporcionados para dispositivos experimentales y comerciales generalmente se refieren a niveles de *crosstalk* entre canales individuales, es decir, el *crosstalk* resultante de un solo canal. En un entorno operativo, las contribuciones de *crosstalk* de todos los canales aumentarán el *crosstalk*, esto en comparación con la atenuación del *crosstalk* de un solo canal. (Nota: Uno debe tener en mente que el *crosstalk* se define de tal manera que por razones de legibilidad, cuanto mayor sea, mejor. Aunque este alto *crosstalk* es algo contraintuitivo).

El *crosstalk* puede producirse mediante muchos mecanismos. Discutiremos seis de ellos. Los primeros cuatro pueden mantenerse bajos mediante un diseño adecuado. Los otros dos se deben a imperfecciones en el proceso de fabricación y son más difíciles de reducir.

Es habitual en la literatura sobre dispositivos WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) caracterizar el rendimiento de *crosstalk* especificando la cifra del *crosstalk* de un solo canal, es decir, el valor máximo de *crosstalk* que se mide con un canal de entrada activo. En condiciones de funcionamiento, el *crosstalk* será mayor que este valor porque todos los canales de entrada activos contribuirán a ella. Takahashi et al [42] ofrecen un análisis de la penalización por *crosstalk* en funcionamiento simultáneo de multicanal.

- *crosstalk* del receptor: La fuente más obvia de *crosstalk* es el acoplamiento entre los receptores a través de las colas exponenciales de las distribuciones de campo. Este tipo de *crosstalk* se deriva directamente de la ec. 3.58. Debido a que ahora estamos observando el acoplamiento a través de las colas exponenciales del campo modal, la aproximación gaussiana no es válida y la integral debe evaluarse usando las expresiones para el perfil modal (normalizado). En la Figura 3.22(a), se muestra el *crosstalk* debido a campos superpuestos para diferentes *V-parameters laterales*. Las curvas son casi independientes de la polarización. Nótese que en guías de onda dependientes de la polarización, el *V-parameter*lateral dependerá de la polarización.

- Truncamiento: Otra fuente de *crosstalk* resulta del truncamiento del campo debido al ancho finito de la apertura del conjunto de *arrays*. Esto hace que se pierda energía en la apertura de entrada, y en la apertura de salida aumentará el nivel del lóbulo lateral del campo focal. Para el diseño AWG adecuado, el ángulo de apertura del conjunto de *arrays* debe elegirse de modo que el *crosstalk* correspondiente sea suficientemente baja (dependerá de la aplicación específica del diseñador). La Figura 3.22(b) muestra la potencia transmitida (línea continua) y el *crosstalk* versus el ángulo medio de apertura θ_a del conjunto de *arrays*, normalizado al ancho gaussiano θ_0 como se definió en 3.53, para diferentes valores de la separación relativa del receptor d_r/w. Los valores mostrados están calculados para guías de ondas de entrada y salida con V=3. Como la estimación de la Figura 3.22(a) es bastante pesimista, es mejor utilizar el representado por la línea en negrita. La dependencia del *V-parameter* es pequeña. La envolvente de las curvas del medio (línea en negrita) se puede utilizar para estimar el nivel máximo de *crosstalk*. Se ve que para $\theta_a > 2\theta_0$ el *crosstalk* es inferior a -35 dB.

- Conversión de modo: si las guías de onda del conjunto no son estrictamente de modo único, un modo de primer orden excitado en las uniones entre las guías de onda rectas y curvas puede propagarse coherentemente a través

del conjunto y provocar imágenes "fantasmas". Debido a la diferencia en la constante de propagación entre el modo fundamental y el de primer orden, estas imágenes aparecerán en diferentes ubicaciones y la "imagen fantasma" puede acoplarse a un receptor no deseado, degradando así el rendimiento del *crosstalk*. La conversión de modo se puede mantener pequeña optimizando el desplazamiento en las uniones con una excitación de modo mínima de primer orden.

- Acoplamiento en el arreglo de guías de onda: También se puede producir *crosstalk* por distorsión de fase debido al acoplamiento en las secciones de entrada y salida de los arreglos. Se podría esperar que este tipo de acoplamiento no afecte en gran medida las propiedades de enfoque y dispersión de la matriz, por motivos similares mencionados en la ec. 3.48, o por el índice del grupo $\hat{n}_g$ de las guías de onda del *array*. Se puede considerar que llenar los espacios cerca de las aperturas del conjunto de *arrays*, introduce un acoplamiento extremadamente fuerte en las regiones de entrada y salida, sin degradar el rendimiento de AWG [54].

- Incoherencia de transferencia de fase: una quinta fuente de *crosstalk* resulta de la incoherencia del conjunto en fase debido a imperfecciones en el proceso de fabricación. La longitud del camino óptico del conjunto de guías de onda, es del orden de varios miles de longitudes de onda. Las desviaciones en la constante de propagación pueden provocar errores considerables en la transferencia de fase y, en consecuencia, un aumento del nivel de *crosstalk*. Takada et al. [86] y Yamada et al. [55], [56] han demostrado que es posible mejorar el *crosstalk* corrigiendo los errores de fase. Los errores de fase pueden ser causados por pequeñas desviaciones en el índice efectivo, debido a variaciones locales en la composición, espesor de la película o ancho de la guía de onda, o por un relleno no homogéneo del espacio cerca de las aberturas del conjunto en fase. También errores más sistemáticos, por ejemplo, debido a la discretización en la generación del patrón de la fotomáscara en los procesos litográficos, pueden contribuir al *crosstalk* [57].

- Radiación de fondo: Como última fuente posible de *crosstalk*, mencionamos la radiación de fondo debida a la luz dispersada fuera de las guías de ondas en las uniones o en los bordes rugosos de las guías de onda. Esto es especialmente importante en estructuras de guías de onda donde la luz además de ser guiada en la guía de onda, por ejemplo, es guiada por guías del tipo *rib* grabadas superficialmente (etched), o en estructuras de guías de onda sobre un sustrato

fuertemente dopado donde la capa *buffer* no dopada, que también puede actuar como guía de onda.

El *crosstalk* en dispositivos prácticos, no está limitada por el diseño sino por las imperfecciones en el proceso de fabricación.

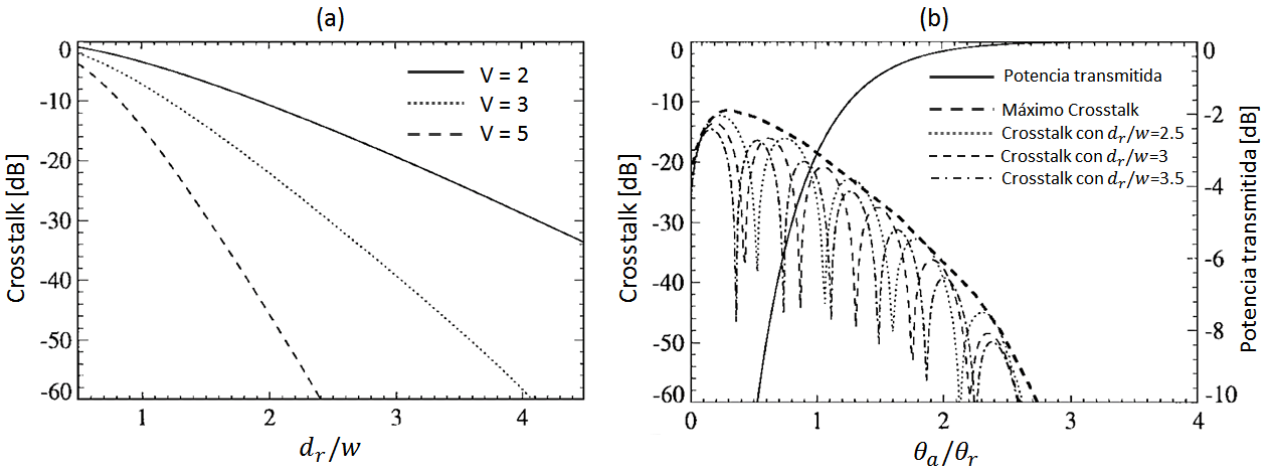


Figura 3.22: (a) *Crosstalk* resultante del acoplamiento entre dos canales adyacentes del receptor, para diferentes valores del *V-parameter* lateral de las guías de ondas del receptor. (b) Potencia transmitida (línea continua) y *crosstalk* en función de la apertura relativa del conjunto θ_a/θ_0, para diferentes valores de la separación relativa del receptor d_r/d_w (d_r/d_w = 2.5, 3.0, 3.5). Los valores mostrados se calculan para guías de ondas de entrada y salida con V = 3. La línea en negrita indica la envolvente de las curvas de *crosstalk* (nivel máximo de *crosstalk*).

Dependencia de la Polarización

La fase de las guías de onda en los *arrays*, son independientes de la polarización si las guías de onda del arreglo son independientes de la polarización, es decir, si las constantes de propagación para los modos fundamentales TE y TM son iguales. La birrefringencia de la guía de onda, es decir, una diferencia en las constantes de propagación, resultará en un desplazamiento Δf_{pol} de las respuestas espectrales entre sí, lo que se denomina dispersión de polarización. Se puede calcular si consideramos las longitudes de onda en la guía de onda. La luz con diferentes longitudes de onda en el vacío se acoplará en la misma guía de onda receptora, si las longitudes de onda λ_{TE} y λ_{TM} de los modos fundamentales en la guía de onda son iguales:

$$\lambda_{\text{TM}}(f) = \frac{c}{f \cdot n_{\text{TM}}(f)} = \lambda_{\text{TE}}(f - \Delta f_{\text{pol}}) = \frac{c}{(f - \Delta f_{\text{pol}}) \cdot n_{\text{TE}}(f - \Delta f_{\text{pol}})} \quad (3.63)$$

en la cual n_{TE} y n_{TM} son los índices efectivos para ambas polarizaciones. Resolviendo Δf_{pol} de la ec. 3.63, encontramos

$$\Delta f_{\text{pol}} \approx f \cdot \frac{(n_{\text{TE}} - n_{\text{TM}})}{\hat{n}_{\text{TE}}} \tag{3.64}$$

en la cual $\hat{n}_{\text{TE}}$ es el índice de grupo. En estructuras de guías de onda con doble hetero-estructura (DH) como InGaAlAsP-InP, Δf_{pol} es típicamente del orden de 4–5 nm. Para guías de onda de *sílice*, y más generalmente, para guías de onda de bajo contraste de índice, será mucho menor.

Referencias

[1] W. Huang et al. «Journal of Lightwave Technology». En: 10 (1992), pág. 295.

[2] A. J. Lim et al. «J. Sel. Top. Quantum Electron.» En: 20 (2014), pág. 405.

[3] R. L. Geiger, P. E. Allen y N. R. Strader. *VLSI Design Techniques for Analog and Digital Circuits*. New York: McGraw-Hill, 1990.

[4] Lukas Chrostowski y Michael Hochberg. *Silicon Photonics Design: From Devices to Systems*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2015.

[5] Wim Bogaerts y Lukas Chrostowski. «Silicon Photonics Circuit Design: Methods, Tools and Challenges». En: *Nanophotonics* 6.1 (2018), págs. 15-29. DOI: 10.1002/lpor.201700237.

[6] *Lumerical: Photonic Simulation Software*. URL: https://www.lumerical.com/ (visitado 21-04-2024).

[7] *Synopsys Photonic Solutions*. URL: https://www.synopsys.com/photonic-solutions.html (visitado 01-06-2021).

[8] *Luceda Photonics*. URL: https://www.lucedaphotonics.com/ (visitado 21-12-2023).

[9] *COMSOL Multiphysics®*. URL: https://www.comsol.com/ (visitado 01-03-2020).

[10] *OptiFDTD Overview*. URL: https://optiwave.com/optifdtd-overview/ (visitado 01-03-2020).

[11] *Photon Design*. URL: https://www.photond.com/ (visitado 01-06-2021).

[12] Jian-Ming Jin. *The Finite Element Method in Electromagnetics*. John Wiley & Sons, 2015.

[13] Zhaoming Zhu y Thomas G. Brown. «Full-vectorial finite-difference analysis of microstructured optical fibers». En: *Optics Express* 10.17 (2002), págs. 853-864.

[14] *WGMODES*. URL: http://www.photonics.umd.edu/software/wgmodes/ (visitado 14-04-2021).

[15] Allen Taflove y Susan C. Hagness. *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*. 3rd. cit. on p. 31. Artech House, 2005. ISBN: 1580538320.

[16] Stephen D. Gedney. *Introduction to the Finite-difference Time-domain (FDTD) Method for Electromagnetics*. Vol. 6. Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics 1. cit. on p. 31. 2011, págs. 1-250.

[17] Shih-Hui Chang y Allen Taflove. «Finite-difference time-domain model of lasing action in a four-level two-electron atomic system». En: *Optics Express* 12.16 (2004). cit. on p. 31, págs. 3827-3833.

[18] FDTD Solutions – Lumerical's Nanophotonic FDTD Simulation Software. *FDTD Solutions*. cit. on p. 32. URL: http://www.lumerical.com/fdtd (visitado 14-04-2024).

[19] FDTD Solvers – Acceleware Ltd. *FDTD Solvers*. cit. on p. 32. URL: http://www.acceleware.com/fdtd-solvers (visitado 14-04-2024).

[20] MODE Solutions – Waveguide Mode Solver and Propagation Simulator. *MODE Solutions*. cit. on pp. 30, 36. URL: http://www.lumerical.com/mode (visitado 14-04-2024).

[21] R. M. Knox y P. P. Toulios. «Integrated Circuits for the Millimeter through Optical Frequency Range». En: *Proceedings of the Symposium on Submillimeter Waves*. Vol. 20. cit. on p. 36. Brooklyn, NY, 1970, págs. 497-515.

[22] M. Hammer y O. V. Ivanova. «Effective index approximations of photonic crystal slabs: a 2-to-1-D assessment». En: *Optical and Quantum Electronics* 41.4 (2009). cit. on p. 36, págs. 267-283.

[23] Allan W. Snyder y John D. Love. *Optical Waveguide Theory*. London: Chapman y Hall, 1983.

[24] Lumerical INTERCONNECT – Photonic Integrated Circuit Design Tool. *Lumerical INTERCONNECT*. cit. on pp. 40, 41. URL: http://www.lumerical.com/tcad-products/interconnect/ (visitado 14-05-2024).

[25] Laurent Vivien y Lorenzo Pavesi. *Handbook of Silicon Photonics*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013.

[26] Amnon Yariv. «Coupled-mode theory for guided-wave optics». En: *IEEE Journal of Quantum Electronics* 9.9 (1973). cit. on pp. 92, 108, págs. 919-933.

[27] Amnon Yariv y Pochi Yeh. *Photonics: Optical Electronics in Modern Communications*. The Oxford Series in Electrical and Computer Engineering. cit. on p. 92. Oxford University Press, Inc., 2006.

[28] Yi Zhang et al. «A compact and low loss Y-junction for submicron silicon waveguide». En: *Optics Express* 21.1 (2013). cit. on pp. 111, 112, págs. 1310-1316.

[29] L. B. Soldano y E. C. M. Pennings. En: *Journal of Lightwave Technology* 13 (1995), pág. 615. DOI: 10.1109/50.387317.

[30] W. Bogaerts. «Nanophotonic waveguides and photonic crystals in silicon-on-insulator». PhD Thesis (in Dutch). Tesis doct. Ghent, Belgium: Ghent University, 2004.

[31] Jingtao Zhou et al. «Design and fabrication of a compact multimode interference splitter with silicon photonic nanowires». En: *Chinese Optics Letters* 7 (nov. de 2009), págs. 1041-1044. DOI: 10.3788/COL20090711.1041.

[32] W. Bogaerts, P. De Heyn, T. Van Vaerenbergh et al. «Silicon microring resonators». En: *Laser & Photonics Reviews* (2012). (cit. on p. 115).

[33] Jens Buus, Markus-Christian Amann y Daniel J. Blumenthal. *Tunable Laser Diodes and Related Optical Sources*. 2nd. cit. on pp. 119, 120. John Wiley & Sons, Inc., 2005.

[34] Larry A. Coldren, Scott W. Corzine y Milan L. Mashanovitch. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits*. Wiley Series in Microwave and Optical Engineering. Citado en p. 121. John Wiley & Sons, 2012. ISBN: 9781118148181.

[35] C. Brackett et al. «Dense wavelength division multiplexing networks: Principles and applications». En: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 8.6 (1990), págs. 948-964. DOI: 10.1109/49.56062.

[36] M. Smit y C. Van Dam. «PHASAR-based WDM-devices: Principles, design and applications». En: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 2.2 (1996), págs. 236-250. DOI: 10.1109/2944.571757.

[37] C. Dragone. «An N x N optical multiplexer using a planar arrangement of two star couplers». En: *IEEE Photon. Technol. Lett.* 3 (sep. de 1991), págs. 812-815.

[38] C. Dragone, C. Edwards y R. Kistler. «Integrated optics $n \times n$ multiplexer on silicon». En: *IEEE Photonics Technology Letters* 3.10 (1991), págs. 896-899. DOI: 10.1109/68.86163.

[39] M. Zirngibl, C. Dragone y C. Joyner. «Demonstration of a 15×15 arrayed waveguide multiplexer on InP». En: *IEEE Photonics Technology Letters* 4.11 (1992), págs. 1250-1253. DOI: 10.1109/68.179274.

[40] K. Okamoto, K. Moriwaki y S. Suzuki. «Fabrication of 64×64 arrayed-waveguide grating multiplexer on silicon». En: *Electronics Letters* 31.3 (1995), págs. 184-186. DOI: 10.1049/el:19950132.

[41] D. Dai et al. «Low-loss Si3N4 arrayed-waveguide grating (de) multiplexer using nano-core optical waveguides». En: *Optics Express* 19.15 (2011), págs. 14130-14136. DOI: 10.1364/OE.19.014130.

[42] H. Takahashi et al. «Transmission characteristics of arrayed waveguide NXN wavelength multiplexer». En: *IEEE Journal of Lightwave Technology* 13.3 (1995), págs. 447-455. DOI: 10.1109/50.365481.

[43] P. Cheben et al. «A high-resolution silicon-on-insulator arrayed waveguide grating microspectrometer with submicrometer aperture waveguides». En: *Optics Express* 15.5 (2007), págs. 2299-2306. DOI: 10.1364/OE.15.002299.

[44] N. A. Yebo et al. «On-chip arrayed waveguide grating interrogated silicon-on-insulator microring resonator-based gas sensor». En: *IEEE Photonics Technology Letters* 23.20 (2011), págs. 1505-1507. DOI: 10.1109/LPT.2011.2162635.

[45] V. D. Nguyen et al. «Spectral domain optical coherence tomography imaging with an integrated optics spectrometer». En: *Optics Letters* 36.7 (2011), págs. 1293-1295. DOI: 10.1364/OL.36.001293.

[46] N. Ismail et al. «Raman spectroscopy with an integrated arrayed-waveguide grating». En: *Optics Letters* 36.23 (2011), págs. 4629-4631. DOI: 10.1364/OL.36.004629.

[47] Tom Claes, Wim Bogaerts y Peter Bienstman. «Vernier-cascade label-free biosensor with integrated arrayed waveguide grating for wavelength interrogation with low-cost broadband source». En: *Optics Letters* 36.17 (2011), págs. 3320-3322. DOI: 10.1364/OL.36.003320.

[48] Andreas Stoll, Kalaga V. Madhav y Martin M. Roth. «Design, simulation and characterization of integrated photonic spectrographs for astronomy: generation-I AWG devices based on canonical layouts». En: *Opt. Express* 29 (2021), págs. 24947-24971. DOI: 10.1364/OE.421064.

[49] C. R. Doerr, L. Zhang y P. J. Winzer. «Monolithic InP multiwavelength coherent receiver using a chirped arrayed waveguide grating». En: *Journal of Lightwave Technology* 29.4 (2011), págs. 536-541. DOI: 10.1109/JLT.2011.2105547.

[50] Gargallo Jaquotot y Bernardo Andres. «Advanced arrayed waveguide gratings: models, design strategies and experimental demonstration». En: 2016. URL: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:132479433.

[51] Dana Seyringer et al. «Design of low loss silicon nitride 8-channel AWG». En: *AIP Conference Proceedings* 1996.1 (ago. de 2018), pág. 020042. DOI: 10.1063/1.5048894.

[52] R. März. «Integrated Optics: Design and Modeling». En: *Artech House* (1994).

[53] Katsunari Okamoto. *Fundamentals of Optical Waveguides*. 2nd. San Diego, CA: Academic Press, 2006. ISBN: 978-0125250962.

[54] Author's Name. «Integrated Optics in Silicon-Based Aluminum Oxide». Tesis doct. Delft Univ. of Technol., 1991. Cap. 6.

[55] H. Yamada et al. «10 GHz-spaced arrayed-waveguide grating multiplexer with phase-error compensating thin-film heaters». En: *Electron. Lett.* 31.5 (mar. de 1995), págs. 360-361.

[56] H. Yamada et al. «Statically phase-compensated 10 GHz spaced arrayed-waveguide grating». En: *Electron. Lett.* 32.17 (ago. de 1996), págs. 1580-1582.

[57] S. Day et al. «The elimination of sidelobes in the arrayed waveguide WDM». En: *Integrated Photonics Research 1996*. Boston, MA, mayo de 1996, págs. 48-51.

Capítulo 4

Tecnologías de Microfabricación

Índice

4.1. Técnicas de micro-Fabricación 108
4.1.1. No uniformidad en procesos de fabricación. 109
4.1.2. Salas limpias. 110
4.2. Fabricación de wafers de Nitruro de Silicio. 111
4.2.1. Procesos de fabricación con Nitruro de Silicio. 111
4.2.2. Oxidación Térmica. 112
4.2.3. Deposición. 114
4.3. Litografía UV y técnicas asociadas. 118
4.3.1. Breve historia litográfica y formación de imágenes. 118
4.3.2. Procesos litográficos. 120
4.3.3. Fotomáscaras. 121
4.3.4. Fotoresinas. 123
4.3.5. Deposición de Fotoresinas (PR). 125
4.3.6. Exposición UV. 127
4.3.7. Revelado. 130
4.3.8. *Dry Etching.* 131

Se encuentran disponibles múltiples tecnologías de materiales para fabricar circuitos fotónicos integrados (PICs), cada uno de ellos adecuado para una o más aplicaciones, como por ejemplo: niobato de litio [1], *sílice* [2], fosfuro de indio (InP) [3], nitruro de silicio. (SiNx) [4], Silicio sobre aislante (SOI) [5] o Silicio-germanio [6]. La elección de una tecnología depende de muchos aspectos. Uno de los factores más determinantes es el rango de longitud de onda de la aplicación perseguida.

Por ejemplo, para aplicaciones de telecomunicaciones, las longitudes de onda están en el rango de 900 a 1700 nm, donde las fibras ópticas presentan pérdidas de transmisión moderadas y bajas. Por el contrario, para aplicaciones de detección biológica es habitual trabajar en el rango de longitud de onda visible (alrededor de 400-700 nm), donde la luz no daña la materia mediante su interacción. La Figura 2.1 muestra las tecnologías y materiales de integración más representativos, y su correspondiente rango de longitudes de onda de trabajo.

Al momento de escribir esta tesis, tres diferentes plataformas tecnológicas han surgido como las más demandadas por los usuarios debido a una compensación entre los costos/beneficios, lo que resulta en procesos de fabricación estables y además ofrecen, servicios de multi-proyecto de obleas (*Multi Proyect Wafer* - MPW).

La tecnología de silicio sobre aislante (*Silicon-On-Insulator*, SOI) es una tecnología de alto contraste, en la que el campo óptico está fuertemente confinado en la guía de onda [7]. Por esta razón, las guías de ondas ópticas pueden diseñarse para que tengan un núcleo estrecho y un radio de curvatura pequeño, lo que da como resultado estructuras muy pequeñas. También es compatible con la electrónica, ya que los procesos y materiales de fabricación en SOI son aproximadamente los mismos. Además, tiene aplicaciones en espectroscopia en las bandas NIR-MIR [8] [9], gracias a su transparencia en longitudes de onda largas. Como inconveniente, el alto índice de contraste en las guías de ondas, ingresa desfasajes no deseados en los caminos ópticos del espectrómetro, debido a la rugosidad de las paredes laterales y al fuerte confinamiento. En consecuencia, la separación espacial del espectro de entrada se degrada, afectando el rendimiento del espectrómetro. Además, no se pueden fabricar dispositivos activos (es decir, emisores de luz eficientes bombeados eléctricamente) en materiales de Si, y el uso de moduladores y fotodetectores implica pasos de fabricación adicionales.

La tecnología de fosfuro de indio (InP) ofrece dispositivos activos como láseres, amplificadores o fotodetectores para la banda de telecomunicaciones [10]. Por ser una tecnología de contraste de índice medio, el radio de curvatura que se puede obtener es alrededor de 20 veces mayor que para la tecnología SOI, lo que da una visión de la menor densidad de integración que se puede lograr con esta tecnología. Sin embargo, es la única tecnología capaz de integrar monolíticamente amplificación óptica y componentes fotónicos pasivos.

Finalmente, la tecnología de nitruro de silicio (SiNx) se puede utilizar en un rango de longitud de onda muy amplio (desde 500 nm hasta 3500 nm) [11] [12]. Esta característica permite su aplicación no sólo en las bandas de comunicaciones,

sino también en las bandas visible e infrarrojo medio. Por este motivo, es muy interesante para campos como la biosensado o la espectroscopia. Además, esta tecnología ofrece pérdidas de propagación muy bajas.

En este trabajo, hemos utilizado dos de estos nodos tecnológicos para el desarrollo de circuitos fotónicos integrados (PICs). Las tecnologías elegidas fueron el SOI y el SiNx, debido a que los dispositivos estudiados y desarrollados son en este trabajo en su mayoría son dispositivos pasivos. A continuación vamos describir con detalle los procesos de micro-fabricación más relevantes de la tecnología del Silicio.

4.1. Técnicas de micro-Fabricación

Fabricar un circuito óptico consiste en grabar un camino óptico en un determinado material, es decir, imprimir mediante algún método guías de onda en la superficie o interior de un material. Estos canales o caminos ópticos poseerán funcionalidades distintas de acuerdo a las características de su diseño como su geometría y distribución de índice de refracción. Existen varias técnicas de fabricación de micro-guías de onda ópticas en materiales, pero todas consisten en incrementar o reducir el índice de refracción en zonas acotadas del material, de modo tal que un haz de luz pueda propagarse en ciertas direcciones deseadas.

En este trabajo, los procesos de fabricación fueron realizados bajo la plataforma del Si_3N_4.

Actualmente los la industria y procesos de fabricación con Si_3N_4 se encuentran bien desarrollados, las técnicas de fabricación CMOS adaptadas en la industria de la Fotónica de Silicio, podemos resumirlas en en 4 etapas:

- Fabricación de *wafers* de Si_3N_4 sobre SiO_2.
- Fabricación de fotomáscaras con escritura directa láser (*Direct Write Laser* - DWL).
- Procesos litográficos.
- Grabado para definir las paredes de las guías de onda (*Reactive Ion Etching* - RIE).

Las mismas serán descritas secciones más adelante.

4.1.1. No uniformidad en procesos de fabricación.

Los circuitos fotónicos integrados (PICs) a menudo requieren una adaptación precisa de la longitud de onda central y en las constantes de propagación de guías de ondas entre componentes de un chip (por ejemplo, moduladores en anillo, filtros ópticos), particularmente para multiplexación por división de longitud de onda. Entender la variabilidad en la fabricación es crucial para desarrollar estrategias (por ejemplo, ajuste térmico) para la implementación del sistema y para determinar las implicaciones de costo de tales estrategias de compensación (por ejemplo, consumo de energía).

Existen varios estudios sobre la no uniformidad en la fabricación, incluyendo la uniformidad dentro del dispositivo (por ejemplo, doble anillo resonador - CROWs [13]), dentro de la oblea, de oblea a oblea y de lote a lote [14, 15]. El parámetro de fabricación dominante que resulta en variación del dispositivo ha sido identificado como la variación del espesor del silicio, seguido por variaciones en los procesos litográficos (por ejemplo, el ancho de la guía de onda).

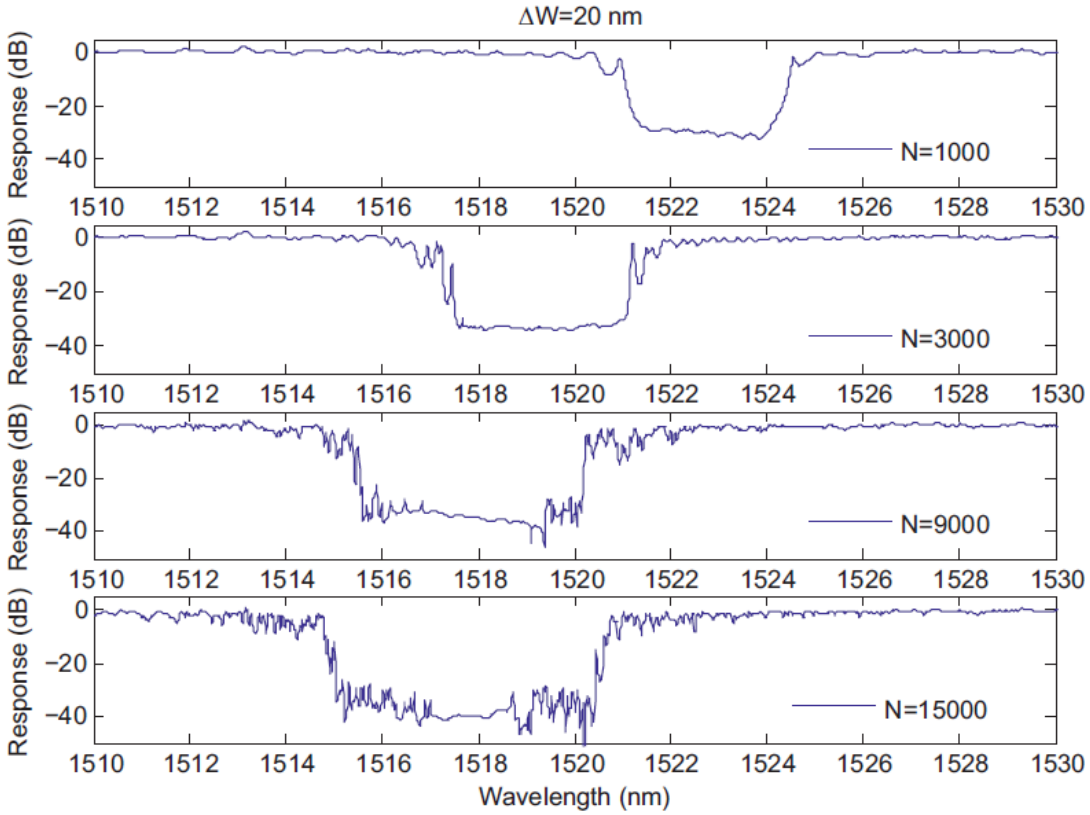


Figura 4.1: Espectros de transmisión medidos en redes de Bragg con un ancho de corrugación de 20 nm para varias longitudes, que muestran un efecto de ampliación del ancho de banda al aumentar la longitud y variaciones de longitud de onda debido a variaciones de fabricación. Dispositivos: guías de ondas tipo *strip* con *cladding* de aire, w=500 nm, ∧=325 nm. Adaptado de Chrostowski, 2015 [16]

En la Figura 4.1 se muestra un ejemplo de falta de uniformidad en la fabricación y su impacto en el rendimiento del dispositivo [16]. Se trata de redes de Bragg, con longitudes que oscilan entre $325\mu m$ y $4,9mm$. Teóricamente, a medida que aumenta la longitud, el ancho de banda debería permanecer constante o disminuir si el acoplamiento es débil[17], según la ecuación:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_B^2}{\pi n_g}\sqrt{\kappa^2 + (\pi/L)^2} \tag{4.1}$$

Por el contrario, observamos experimentalmente que la banda se ensancha cuando la red se alarga, como se muestra en la Figura 4.1. Esto se debe a las variaciones de la geometría de la guía de ondas a lo largo del chip fabricado. También se ve que la longitud de onda central varía para los cuatro dispositivos mostrados.

4.1.2. Salas limpias.

Las salas limpias son necesarias porque las personas, la maquinaria de producción y la estructura del edificio generan contaminación produciendo millones de partículas, además, los materiales de construcción convencionales pueden descomponerse y generar contaminación química. Una sala limpia controla la dispersión de toda esta contaminación potencial para permitir que la fabricación se lleve a cabo en un entorno limpio para que se consiga la correcta calidad y fiabilidad del producto, siendo esto un aspecto clave para poder implementar esta tecnología. Una sala limpia tiene un significado especial y se define bajo la norma ISO 14644-1 como: "Sala en la que se controla la concentración de partículas en el aire, y que está construida y utilizada de manera que se minimice la introducción, generación y retención de partículas dentro de la sala y en la que otros parámetros relevantes, como: la temperatura, la humedad y la presión se controlan según sea necesario"[18]. Esto se consigue, en primer lugar, aportándole una cantidad excepcionalmente grande de aire filtrado con filtros de alta eficiencia. Este aire se utiliza (1) para diluir y eliminar las partículas, bacterias y productos químicos dispersos del personal, la maquinaria y otras fuentes dentro de la habitación y (2) para presurizar la habitación y garantizar que no fluya aire sucio hacia la sala limpia. En segundo lugar, una sala limpia se construye con materiales que no generan partículas ni contaminación química en el aire y se pueden limpiar fácilmente. Finalmente, el personal de las salas limpias utiliza ropa que lo envuelve y minimiza su dispersión de partículas y microorganismos.

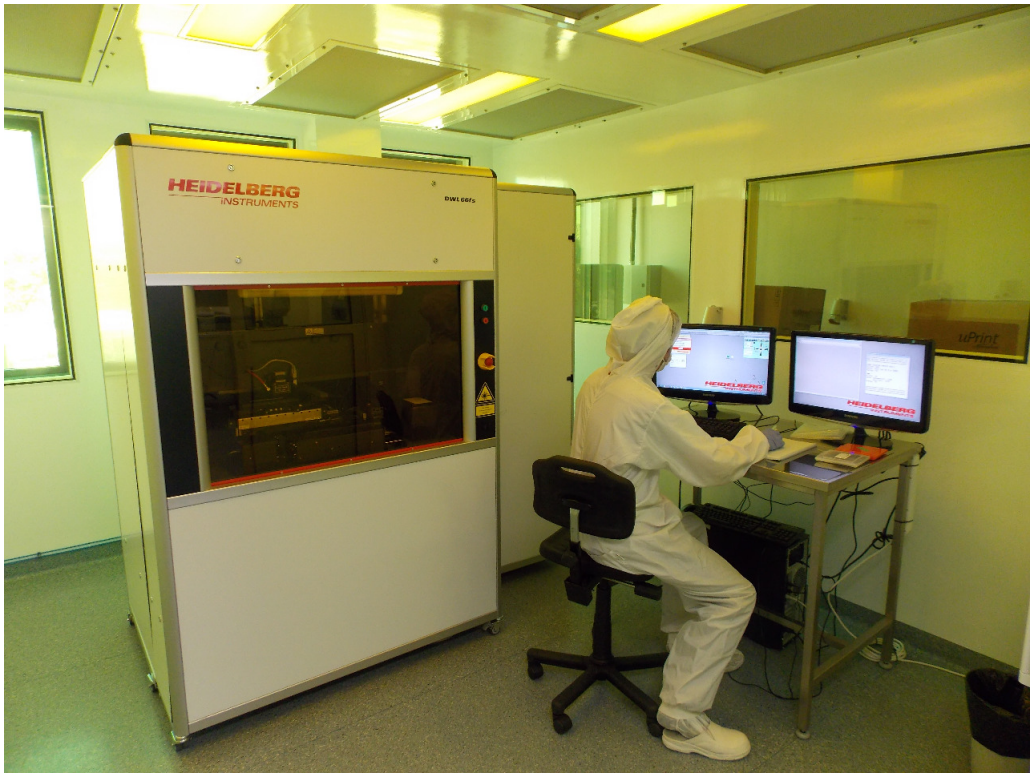


Figura 4.2: Sala limpia del Departamento de Micro y Nanotecnología - Centro Atómico Constituyentes (C.A.C - CNEA)

4.2. Fabricación de wafers de Nitruro de Silicio.

Primero, se cuenta con obleas de Silicio y se limpian con fluoruro de hidrógeno (HF) para eliminar el dióxido de silicio nativo de las obleas. Luego, mediante oxidación térmica seca, se desarrolla una capa de SiO_2 de 1500 nm. Finalmente, la capa de Nitruro de Silicio se puede depositar mediante varias técnicas de deposición, pero en este trabajo nos vamos a focalizar en las técnicas: PECVD (*Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition*), y LPCVD (*Low-Pressure Chemical Vapor Deposition*). En ambos casos, las recetas de depósito se ajustan para una deposición de 300 nm, el resultado de esta composición de capas, son las obleas (*wafers*) que se observan en la figura 4.3. En las próximas secciones, vamos a detallar cada uno estos procesos.

4.2.1. Procesos de fabricación con Nitruro de Silicio.

Las capas de SiO_2 y Si_3N_4 se fabrican mediante técnicas compatibles con tecnología CMOS, como la oxidación térmica y equipos de técnicas de deposición química de vapor estándar industrial de baja presión (LPCVD) y plasma mejora-

do (PECVD) que permiten una producción en volumen rentable. Se encuentran disponibles varias geometrías de sección transversal de guía de ondas. En general, las secciones transversales mostradas funcionan a 1550 nm y muestran pérdidas inferiores a 0,5 dB/cm y un radio de curvatura mínimo típicamente de alrededor de 50 μm. El acoplamiento de entrada/salida se logra mediante convertidores de tamaño de punto adiabáticamente cónicos (*linear tapers*) con una pérdida de acoplamiento de <1 dB a la fibra monomodo estándar. Otra forma típica de acoplamiento es mediante *grating couplers*.

Los mecanismos responsables de la pérdida de propagación óptica en guías de ondas de nitruro de silicio que emplean diferentes recetas de fabricación han sido descritos previamente y explorados experimentalmente por Sandia Labs en [19]. En resumen, las pérdidas de propagación se reducen mediante la eliminación de impurezas en las capas de nitruro de silicio y óxido de silicio (por ejemplo, mediante recocido) y reduciendo la rugosidad de la superficie (rugosidad de la película y rugosidad de la pared lateral de la guía de ondas) junto con el confinamiento del modo en la longitud de onda de operación (dada por la sección transversal, el ancho y la altura de la guía de ondas, así como por la altura del sustrato y del revestimiento); aquellas secciones transversales para las cuales el modo óptico siente menos rugosidad de la pared lateral (ya sea debido a un fuerte confinamiento, baja rugosidad o ambos), estarán sujetas a menores pérdidas de propagación. Para fabricar guías de onda de SiN se puede utilizar tanto la litografía paso a paso como la litografía de contacto, considerando el índice efectivo relativamente bajo en comparación con el Si, lo que permite anchos de guía de onda relativamente grandes mientras se mantienen las características de modo único. Utilizando herramientas típicas de litografía paso a paso disponibles comercialmente, se pueden fabricar líneas/espacios de 250 nm. El ancho de 250 nm para las líneas/espacios es suficiente para todas las aplicaciones en esta plataforma.

Las obleas de Silicio, son la base en donde van a ser fabricados los dispositivos fotónicos integrados. En primer lugar partimos de un sustrato de silicio puro, en donde se van a depositar varias capas. Para el caso de la plataforma tecnológica del Nitruro de Silicio, estas se conforman por tres etapas: una base de silicio puro, una capa intermedia de SiO_2 y una capa superior Si_3N_4. (ver figura 4.3).

4.2.2. Oxidación Térmica.

Para crecer capas de $Si0_2$, empleamos técnicas de oxidación térmica. Es una técnica de elemental en el proceso de fabricación de semiconductores, e implica consumir la superficie de la oblea de Silicio. Existen dos tipos de oxidación térmica,

la primera es la oxidación húmeda y la segunda oxidación seca.

$$Si + 2H_2O \longrightarrow SiO_2 + 2H_2 \text{ (Oxidación húmeda).}$$
$$Si + O_2 \longrightarrow SiO_2 \text{ (Oxidación seca).}$$

La oxidación húmeda se realiza a través de vapor agua a una temperatura de $900°C$ a $1000°C$. El crecimiento es más rápido pero presenta como desventajas mayores impurezas y menor control sobre la oxidación.

La oxidación seca se realiza con oxígeno puro a una temperatura aproximada de $1200°C$. Es un proceso más lento, pero cuenta con la ventaja de ofrecer un mayor control sobre el proceso. El óxido producido con la oxidación seca es de mayor calidad al presentar menos impurezas.

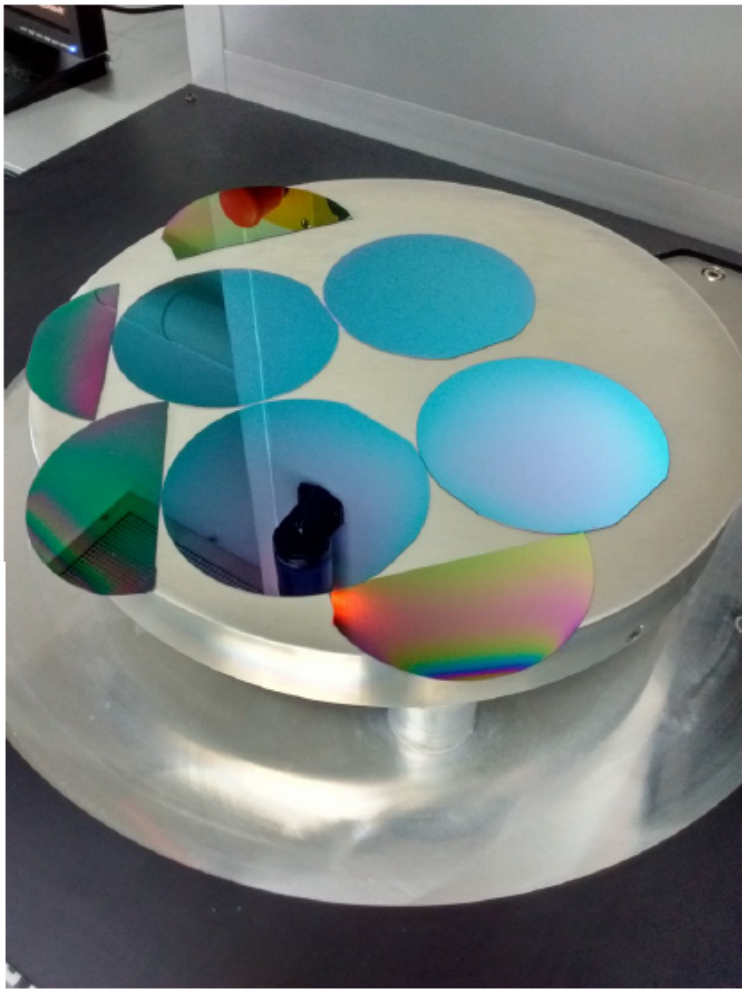


Figura 4.3: Obleas de Nitruro de Silicio fabricadas en CNEA.

4.2.3. Deposición.

A través de los años, la industria de los semiconductores ha generado y mejorado distintas técnicas de deposición. Las técnicas más empleadas son la Deposición Química por Vapor (CVD) y la Deposición Física de Vapor (PVD). En este trabajo nos vamos a enfocar en la técnica CVD.

La **Deposición Química de Vapor** (CVD) es una de las principales opciones de fabricación de películas delgadas, es un método híbrido que utiliza productos químicos en fase de vapor, se utiliza convencionalmente para obtener recubrimientos de una variedad de materiales orgánicos e inorgánicos. Además, se utiliza ampliamente en la industria debido a que su instrumentación es relativamente simple, su facilidad de procesamiento, y la posibilidad de depositar diferentes tipos de materiales y viabilidad económica. CVD se utiliza ampliamente en la industria de semiconductores y ha desempeñado un rol importante en la miniaturización de transistores al introducir una deposición de películas muy delgadas de silicio. El método CVD es muy versátil y funciona a presión baja o atmosférica y temperaturas relativamente bajas [20]. Existen muchas variantes de CVD como: CVD Metaloorgánico (MOCVD), CVD a presión Atmosférica (APCVD), Epitaxial en fase de vapor (VPE), CVD mejorada con plasma (PECVD) y CVD de baja presión (LPCVD). Se diferencian en la presión del gas fuente, la disposición geométrica y la temperatura utilizada, sin embargo, el proceso básico de CVD, puede considerarse como un transporte de vapor reactivo o gas reactivo hacia el sustrato, mantenido a una temperatura alta donde el reactivo se fragmenta en diferentes productos que se difunden en la superficie, sufren alguna reacción química en un sitio apropiado, se nuclean y crecen para formar la película de material deseado. Los subproductos creados en el sustrato deben transportarse de regreso a la fase gaseosa eliminándolos del sustrato [21]. La energía térmica es la única fuerza impulsora de los reactores CVD de alta temperatura; para la deposición a baja temperatura, se necesita una fuente de energía adicional. Se puede utilizar plasma de radiofrecuencia (RF), fotorradiación o radiación láser para mejorar el proceso, conocido como deposición química de vapor mejorada con plasma (PECVD), CVD asistida por fotones y CVD asistida por láser (LCVD), respectivamente [22].

LPCVD.

Low Preassure Chemical Vapor Deposition: El LPCVD a presiones inferiores a 10 Pa permite recubrir múltiples obleas simultáneamente sin afectar adversamente la uniformidad de la película. Esto se debe al alto coeficiente de difusión

a bajas presiones, lo que resulta en un crecimiento limitado por la velocidad de las reacciones superficiales en lugar de la velocidad de transferencia de masa al sustrato. La velocidad de reacción en la superficie es altamente sensible a la temperatura, pero la temperatura es relativamente fácil de controlar. Por lo general, los reactivos se pueden usar sin dilución, lo que resulta en tasas de crecimiento aproximadamente un orden de magnitud menor que las operaciones a presión atmosférica (APCVD). En muchos casos, los sistemas LPCVD pueden superar las limitaciones de uniformidad, cobertura de pasos o escalones y contaminación de partículas que presentan los sistemas de APCVD y PECVD. Sin embargo, el LPCVD presenta dos desventajas: una tasa de deposición baja y temperaturas de funcionamiento relativamente altas. Los reactores de tubo horizontal y pared caliente son los más comúnmente utilizados en LPCVD, recubriendo tanto las obleas como las paredes de la cámara de reacción. Estos sistemas requieren una limpieza frecuente para evitar la contaminación por partículas, pero encuentran una amplia aplicación debido a su economía, rendimiento, uniformidad y pureza.

PECVD.

Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition: Un plasma inducido por RF transfiere energía a los gases reactivos, lo que permite que el sustrato permanezca a temperaturas más bajas que en los procesos APCVD y LPCVD. Un control adecuado de la temperatura del sustrato garantiza la uniformidad. Las obleas se colocan sobre un electrodo puesto a tierra, donde se someten a un bombardeo menos energético que las obleas colocadas sobre un electrodo motorizado. Las películas de PECVD no presentan una estequiometría definida, dado que las reacciones de deposición exhiben una amplia variabilidad, y el bombardeo de partículas durante el crecimiento de un sistema multicomponente modifica la composición según las proporciones de rendimiento de pulverización catódica de los materiales componentes. A pesar de esta consecuencia negativa del bombardeo de partículas, en general, cuanto mayor sea el bombardeo de iones, mejor será la calidad de la película. La excelente adherencia, la baja densidad de poros, la óptima cobertura de escalones, las adecuadas propiedades eléctricas y la compatibilidad con los procesos de transferencia de patrones de ancho de línea fino, han propiciado la amplia adopción de PECVD en la integración a escala muy grande (VLSI). La aplicación más importante es probablemente la deposición de SiO_2 o Si_3N_4 sobre líneas metálicas [23].

Descripción general de los tipos de procesos CVD. En la Tabla 4.1

revisamos algunos procesos importantes de CVD, enumerando aplicaciones y operaciones.

Resumen del proceso CVD					
Proceso	Ventaja	Desventaja	Aplicación	Observción	Pres/Temp
APCVD	Simple, tasa de deposición alta, baja temperatura	Mala cobertura de pasos, contaminación por partículas	Óxidos de baja temperatura dopados y no dopados	Transporte de masa controlado	100-10kPa, 350-400°C
LPCVD	Excelente pureza y uniformidad, cobertura de pasos adaptable, gran capacidad de producción de obleas	Alta temperatura y baja tasa de deposición	Óxidos de alta temperatura dopados y no dopados, nitruro de silicio, poli-Si, W, WSi2	Control de reacción superficial	100 Pa, 550 - 600 °C
MOCVD	Excelente para epitaxia en grandes superficies	Cuidados de seguridad	Semiconductores compuestos por células solares, láser, fotocátodos, LED Y pozos cuánticos	Producción de gran volumen y gran superficie	1.3 Pa
PECVD	Temperaturas en el sustrato más bajas, rapidez, buena adherencia, buena cobertura de escalones, baja densidad de poros.	Contaminación química (p. ej., hidrógeno) y de partículas	Aislantes de baja temperatura sobre metales, pasivación (nitruro)	Tiende a tener más poros que LPCVD	2-5Torr, 300-400°C

Tabla 4.1: Revisión del proceso CVD. Fuente: adaptado de [24] y [25]

Deposición de Nitruro de Silicio.

El Nitruro de Silicio (Si_xN_y) es un material ampliamente empleado en la industria de microcircuitos y microsensores debido a su conjunto de propiedades superiores en los ámbitos químico, eléctrico, óptico y mecánico. Este material presenta una eficaz barrera de pasivación frente a la difusión de agua y iones móviles, especialmente el sodio catión (Na^+). Asimismo, exhibe una velocidad de

oxidación lenta (aproximadamente 30 veces más lenta que la del silicio) y tiene velocidades de grabado altamente selectivas respecto del SiO_2 y Si en numerosos grabadores (*etchants*). Entre las aplicaciones del nitruro de silicio se incluyen: guías de ondas ópticas (combinando nitruro y óxido), encapsulamiento (actuando como barrera contra la difusión de agua y iones), aislantes (con una resistividad de $10^{16}\Omega \cdot cm$, alta rigidez dieléctrica y límite de ruptura de campo de $10^7 V/cm$), capa de protección mecánica, máscara de grabado, barrera de oxidación y máscara para implantes de iones (con una densidad 1,4 veces mayor que la del SiO_2). El nitruro de silicio también exhibe una notable dureza, con un módulo de Young superior al del silicio. Esta característica lo hace adecuado para aplicaciones como material de cojinete en micro-motores, entre otros usos [26].

El nitruro de silicio puede ser depositado a través de diversas técnicas de CVD (Deposición Química en Fase Vapor), como APCVD, LPCVD y PECVD. Las tensiones intrínsecas del material pueden ser controladas mediante las especificaciones particulares del proceso de deposición. En general, el nitruro y el óxido de silicio depositados con estas técnicas tienden a presentar tensiones residuales excesivas, lo que limita su viabilidad para aplicaciones en componentes mecánicos. Sin embargo, con CVD de oxinitruro de silicio mixto puede resultar en componentes significativamente libres de tensiones.
El nitruro a menudo se deposita a partir de silano (SiH_4) u otros gases que contienen silicio (Si) y amoniaco (NH_3) en una reacción como la siguiente:

$$3SiCl_2 + 4NH_3 \rightarrow Si_3N_4 + 6HCl + 6H_2 \tag{4.2}$$

Nitruro de Silicio con LPCVD:
Descripción: Ampliamente utilizada para depositar Si_3N_4 a presiones reducidas, generalmente entre 0.1 y 1 torr.
Proceso: El proceso involucra la reacción de gases precursores como silano y amoníaco a altas temperaturas (entre 700 y 900°C).
Ventajas: Produce películas de alta calidad con buena uniformidad y adherencia. Es adecuada para aplicaciones en la fabricación de semiconductores y dispositivos fotónicos integrados a gran escala.
Desventajas: Requiere altas temperaturas, lo que puede limitar su uso en sustratos sensibles al calor [27].

Nitruro de Silicio con PECVD:

Descripción: PECVD utiliza un plasma para activar los precursores a temperaturas más bajas (200-400°C).
Proceso: Los precursores típicos son silano y amoníaco o nitrógeno. El plasma se genera mediante una descarga de radiofrecuencia (RF).
Ventajas: Permite la deposición a bajas temperaturas, lo que es beneficioso para sustratos sensibles al calor y para la pasivación en la integración en procesos de microelectrónica.
Desventajas: La calidad de la película no es tan alta como la obtenida con LPCVD debido a la incorporación de impurezas del plasma [28].

4.3. Litografía UV y técnicas asociadas.

4.3.1. Breve historia litográfica y formación de imágenes.

La litografía de semiconductores ha experimentado numerosos cambios en los últimos 50 años. La industria evolucionó desde la impresión por contacto con lámparas de arco de longitud de onda de banda ancha, hacia el uso de motores paso a paso de proyección capaces de generar imágenes de un campo completo. Actualmente, se utilizan escáneres de proyección de reducción 4× que aprovechan fuentes de láser excimero. La resolución máxima de estos sistemas depende de la longitud de onda de la luz (λ), dividida por la apertura numérica (NA).

Los sistemas de iluminación en las modernas herramientas de litografía óptica utilizan láseres excimeros de alta potencia y con un ancho de banda estrecho [29], los cuales proyectan luz dentro del sistema óptico y sobre la máscara o fotomáscara. [30]. La iluminación se puede personalizar mediante iluminadores programables, que consisten en una matriz integrada de microespejos, diseñados para optimizar la calidad de la imagen mediante técnicas de ingeniería computacional del frente de onda [31].

Las imágenes de la fotomáscara se reducen a una cuarta parte (4×) y se proyectan en la oblea. En las herramientas de litografía modernas, la imagen completa de la máscara no se proyecta en la oblea al mismo tiempo. En su lugar, la fotomáscara se mueve o escanea a una velocidad cuatro veces mayor que la de la oblea, en concordancia con el factor de escala. Este movimiento de escaneo sincronizado de la máscara y la oblea es la razón por la que estos sistemas de litografía se denominan escáneres.

La óptica del escáner moderno se compone de múltiples elementos ópticos necesarios para obtener imágenes precisas de las características de una máscara de litografía y luego proyectar las imágenes resultantes en el plano de la oblea con una reducción estándar de 4×, como se muestra en la Figura 4.4. Una característica simplificadora afortunada de estos sistemas es que pueden modelarse con suficiente precisión utilizando aproximaciones de campo lejano de Fraunhofer y óptica de Fourier [32]. En esta aproximación, cualquier número de condensadores, objetivos, proyectores y lentes de transferencia se pueden tratar como una función de transferencia de caja negra, caracterizada por el estado óptico de las ondas que ingresan al sistema óptico desde el plano del objeto y salen del sistema óptico para formar una imagen en el plano de la imagen.

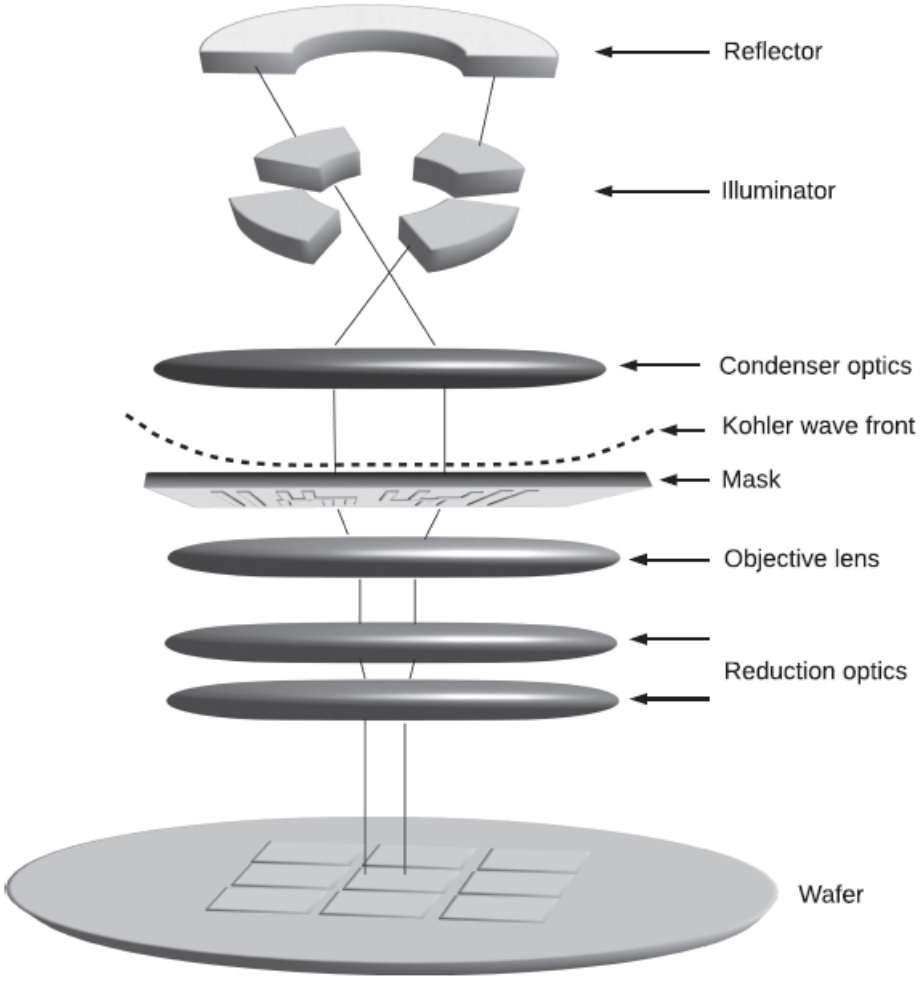


Figura 4.4: Diagrama esquemático de un escáner UV moderno que muestra el camino de la luz a través de un sistema óptico que utiliza iluminación Kohler [33] desde la fuente hasta la oblea. Fuente: Smith 2020 [34]

4.3.2. Procesos litográficos.

La fotolitografía es el proceso fotográfico para transferir patrones de circuitos en una oblea semiconductora. Este proceso es útil para fabricar una variedad de microcomponentes y sistemas, como circuitos electrónicos, acelerómetros, sensores de guía inercial, sensores de presión y flujo. Mediante fotolitografía se puede preparar un patrón de hasta cientos de nanómetros en superficies semiconductoras.

El tamaño del patrón suele oscilar entre 10 y 100 μm. El patrón está diseñado utilizando software de diseño asistido como Autocad o rutinas automatizadas con librerías de Python. Por lo general, el patrón diseñado es más grande y, por lo tanto, se reduce 100 veces. Luego, el diseño estampado del circuito se imprime en una "fotomáscara" (también llamada patrón) en un laboratorio de litografía. Usando una sola fotomáscara, se pueden generar una gran cantidad de patrones en chips semiconductores. Esto se realiza en varios pasos, como limpieza de obleas, metalización, recubrimiento de material fotosensible (*coating*), horneado suave (*soft-baking*), alineación de la máscara, exposición UV, revelado, horneado duro (*hard-baking*) y grabado (*etching*). El proceso de fotolitografía para transferir el patrón se muestra en la Figura 4.5

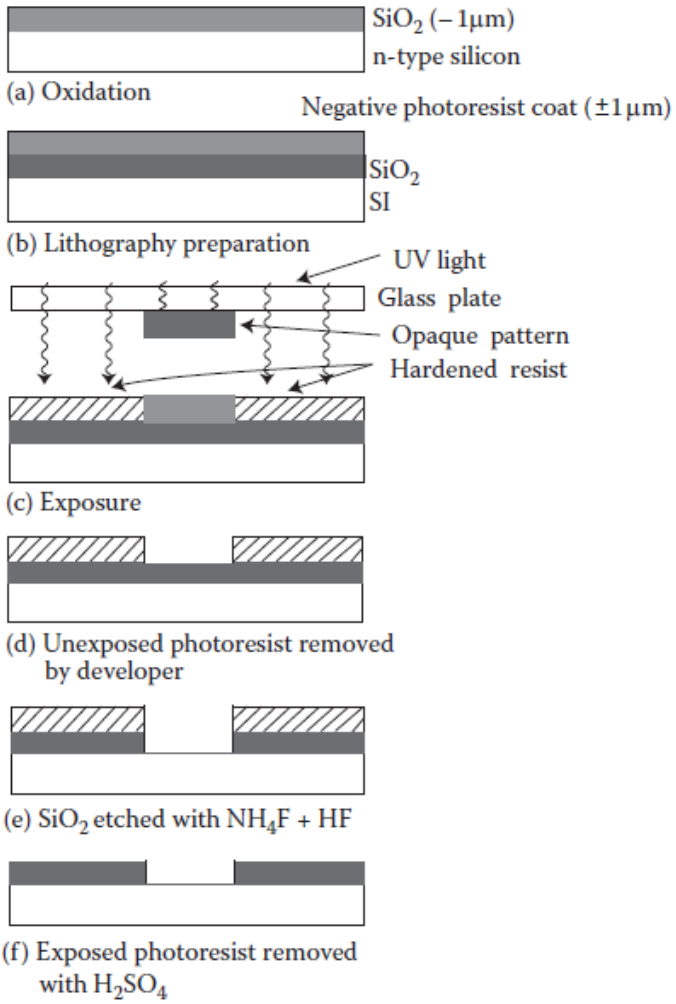


Figura 4.5: Fotolitografía básica y transferencia de patrones. El ejemplo utiliza una oblea de silicio oxidado y un sistema fotorresistente (PR) negativa. Los pasos del proceso incluyen exposición, revelado, grabado con óxido y decapado de resistencia. Fuente: Madou 2011 [35]

En el primer paso, la oblea se limpia químicamente para eliminar impurezas orgánicas, iónicas y metálicas. Después de la limpieza, el dióxido de silicio que sirve como capa barrera se deposita sobre la superficie de la oblea. Luego se apli-

ca fotoprotector (fotoresina, PR) a la superficie de la oblea. Luego, la solución reveladora elimina la capa protectora expuesta, dejando ventanas del material subyacente desnudo. Los fotoprotectores negativos se comportan justo al revés. Cuando se expone a la luz ultravioleta, la parte expuesta se polimeriza y es difícil de disolver en el revelador. Por lo tanto, la resistencia negativa permanece en la superficie donde quiera que esté expuesta y la solución reveladora elimina solo las partes no expuestas. Estos fotoprotectores son generalmente polímeros orgánicos sensibles a la luz. La cocción suave (*soft-baking*) desempeña un papel fundamental porque los recubrimientos fotorresistentes se vuelven fotosensibles o reproducibles sólo después de una cocción suave. La imagen se transfiere del patrón al sustrato exponiéndola a radiación UV. La máscara consta de áreas transparentes y opacas, lo que permite la exposición del material resistente a través de la parte transparente. La exposición altera químicamente el material fotorresistente y altera su solubilidad, que se disuelve en un disolvente adecuado llamado revelador. Finalmente la oblea se lava con una solución decapante para eliminar la superficie no protegida por el fotorresistente.

4.3.3. Fotomáscaras.

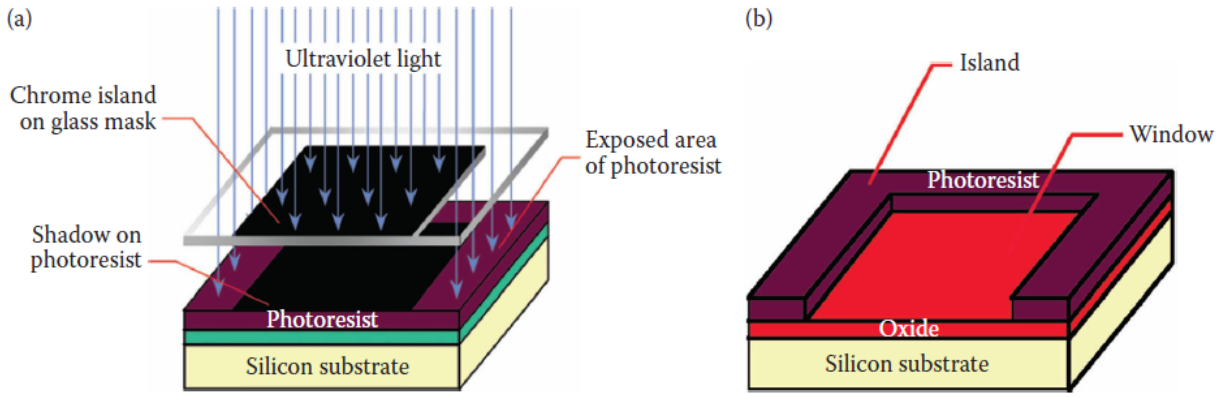


Figura 4.6: (a) Fotomáscara en una configuración de exposición. (b) Patrón resultante en el caso de utilizar un fotoprotector negativo. Fuente: Madou 2011 [35].

La plantilla utilizada para reproducir un patrón específico en obleas cubiertas se llama máscara. En un proceso típico, una fotomáscara consiste en un vidrio casi plano que es transparente al ultravioleta cercano (UV) o una placa de cuarzo (transparente al UV profundo), sobre la cual se aplica un patrón metálico absorbente, como una capa de cromo de 800 Å de espesor. Esta máscara se coloca sobre la superficie cubierta con fotorresistente, y luego se expone el sistema máscara/oblea a radiación UV (ver Figura 4.6(a)). La parte del patrón absorbente de

la fotomáscara bloquea la luz UV, mientras que el vidrio o cuarzo transparente permite que la luz pase a través de el.

Una máscara de campo positivo (o máscara oscura) es aquella en la que el patrón deseado es claro y el fondo es oscuro. Por otro lado, una máscara de campo negativo (o máscara clara) tiene el patrón oscuro sobre un fondo claro. La imagen del patrón, ya sea de campo claro u oscuro, se transfiere a la superficie del semiconductor, lo que se conoce como la polaridad de la máscara (ver Figura 4.7). Este proceso produce una imagen 1:1 de la máscara completa en la oblea de silicio.

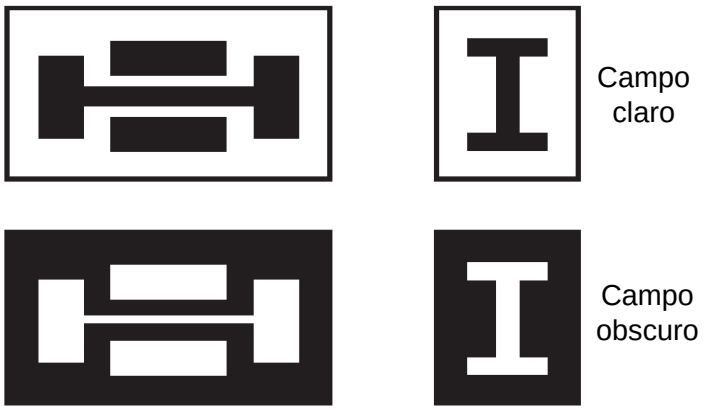


Figura 4.7: Camplo claro vs. campo obscuro.

Las máscaras que hacen contacto físico directo con el sustrato se llaman máscaras de contacto (*hard contact*). Desafortunadamente, estas máscaras se desgastan más rápidamente que las máscaras de proximidad sin contacto (contacto suave o *soft contact*), que están ligeramente elevadas, entre 10 y 20 μm, por encima de la oblea. Los defectos resultantes del contacto duro de las máscaras tanto en la oblea como en la máscara hacen que este método de transferencia de patrones ópticos no sea adecuado para la fabricación de integración a muy gran escala (VLSI).

Revisamos las máscaras de contacto duro porque aún se utilizan en investigación y desarrollo, en la fabricación de máscaras y para la creación de prototipos. La impresión con máscaras de contacto y de proximidad se conoce colectivamente como impresión de sombras. Un método más confiable de enmascaramiento es la impresión por proyección. En lugar de colocar una máscara en contacto directo o cercano con la oblea, la fotomáscara se reproduce sobre la oblea recubierta mediante un sistema de lentes de alta resolución. En este caso, la vida útil de la máscara depende únicamente del manejo del operador. La lente de imagen puede reducir el patrón de la máscara en una proporción de 1:5 o 1:10, lo que hace que la fabricación de la máscara sea menos desafiante. En resumen, actualmente se

utilizan de 3 tipos de litografía para la transferencia de patrones: de contacto, proximidad y proyección.

4.3.4. Fotoresinas.

Las fotoresinas son materiales en estado líquido, viscoso, y que se depositan en la capa superior de las obleas. Las fotoresinas son esenciales para lograr las geometrías de los circuitos fotónicos integrados. En este trabajo usamos fotoresistencias (fotoresinas) de la familia AZ, de la firma Micro Chemicals [1].

Función de las resinas.

La resina de una fotoresistencia (PR) forma una matriz con estructuras de resistencia sintetizadas, y que están destinadas a proteger el sustrato subyacente (como una máscara de cromo) de los ataques químicos o físicos de los procesos litográficos posteriores, como los grabados químico húmedo o seco (*etching*), *electro-plating*, metalizaciones o *lift-off*.

Aunque en teoría cualquier fotoresistencia puede usarse para prácticamente cualquier proceso, la mayoría de las fotoresistencias muestran una resina optimizada para aplicaciones específicas. Las fotoresinas pueden ser de 3 tipos: negativas, positivas y de inversión de imagen. Vamos a profundizar en las fotoresinas positivas que fueron las empleadas en este trabajo.

La resina de todas las resistencias positivas usadas (de la familia AZ de MicroChemicals) es Novolak, químicamente es una resina fenólica poliremizada hecha de formaldehído y fenol.

La longitud de la cadena de las moléculas de la resina determina las propiedades clave de la fotorresistencia. Una longitud de cadena media alta, aumenta la temperatura de reblandecimiento (*softening*), mejorando así la estabilidad térmica durante procesos como el grabado en seco o la metalización (*lift-off*). Esto también reduce la velocidad de eliminación de la fotorresistencia, tanto expuesta como no expuesta, durante los procesos de remoción de la fotoresina. Sin embargo, las moléculas de resina predominantementes de cadena corta, mejoran la adhesión al sustrato para, por ejemplo, grabado químico húmedo o *electroplating*, pero también reduce la temperatura de ablandamiento (*softening*) de la fotorresistencia. Por esta razón, los fotoprotectores comprenden una mezcla correspondientemente ajustada de moléculas de resina con diferentes longitudes de cadena, dependiendo de sus propiedades deseadas o sus principales áreas de aplicación.

[1] https://www.microchemicals.com/

Fotoquímica.

Una resistencia, pasa a ser una fotorresistencia cuando al ser expuesto con ciertas longitudes de onda cambia químicamente y, puede ser aplicable si posteriormente se da paso a una cocción térmica de tal manera que las áreas de resistencia expuestas y no expuestas tengan una velocidad de disolución diferente al ser sometidas por una solución reveladora, lo que permite la realización de una máscara fotorresistente estructurada, como por ejemplo máscaras de cromo con patrones de dispositivos fotónicos.

Fotoresinas Positivas: Las sustancias fotoactivas de la familia AZ positivas, pertenecen al grupo sulfonato DiazoNaphtoQuinon o más simplemente: DNQ. Su presencia en fotorresistencias reduce la tasa de desarrollo de la solubilidad alcalina en las zonas no expuestas, a uno o dos órdenes de magnitud por debajo de la resina fenólica pura sin la adición de DNQ. Por lo tanto, actúa como un inhibidor [36].

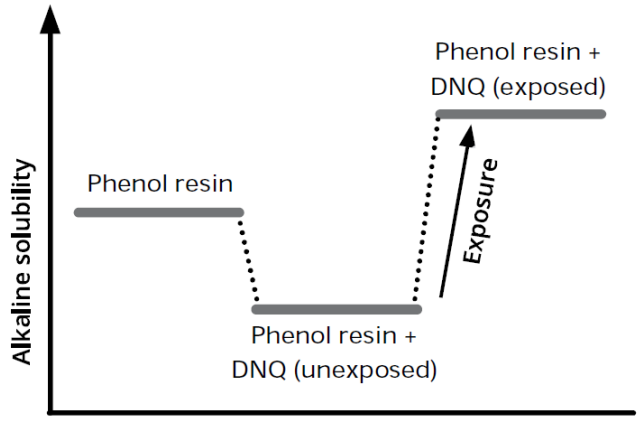


Figura 4.8: La adición de fotoiniciadores a base de DNQ reduce la solubilidad alcalina de la resina fenólica. La exposición hace que aumente en varios órdenes de magnitud.Fuente: MicroChemicals, Application notes: Photoresist composition and properties [36].

Durante la exposición a longitudes de onda apropiadas (dependiendo de la naturaleza química del DNQ: 320-440 nm), el DNQ sufre una transformación y se convierte en un carboxílico ácido por la eliminación de nitrógeno y la unión de una molécula de agua, por lo que la tasa de desarrollo (solubilidad) aumenta de tres a cuatro órdenes de magnitud después de una exposición completa, y ahora pasa a estar muy por encima de la resina fenólica pura como se muestra en la Figura 4.8.

Solventes.

Un parámetro importante para definir las dimensiones de las estructuras es la viscosidad de las fotoresinas, para ello se mezclan solventes con las fotoresinas antes de ser depositados sobre las obleas (*wafers*). La cantidad de solvente que se deba agregar, dependerá de la resolución que se desee alcanzar, del tipo de fotoresistencia y de la técnica que se utilice para depositarlas. Existen varias

técnicas para depositar fotoresinas, las más comunes son:

- *Spin Coating.*
- *Spray Coating.*
- *Dip Coating.*
- *Electostatic spraying.*

En este trabajo, para las fotoresinas usadas (AZ 1518 Y MIR 701), se empleó la técnica de *spin coating*. A continuación vamos a profundizar el depósito de fotoresinas mediante esta técnica.

4.3.5. Deposición de Fotoresinas (PR).

Spin Coating.

Un paso común antes de aplicar un recubrimiento de resina con Si como sustrato es el crecimiento de una capa delgada de óxido en la superficie de la oblea, calentándola a entre 900 y 1150°C en vapor o en una corriente de oxígeno humidificado (ver Figura 4.5(a)). El oxígeno seco también funciona, pero el oxígeno húmedo y el vapor producen resultados más rápidos.

Como primer paso en el proceso de litografía, se deposita una fotorresistencia sensible a la radiación UV, sobre la superficie del óxido (ver Figura 4.5(b)). La fotorresistencia se dispensa sobre la oblea que está colocada en un plato dentro de una centrifugadora de resina (ver Figura 4.9). Haciendo vacío en el plato se mantiene la oblea en su lugar. Se utiliza comúnmente una velocidad de aproximadamente 5000 rpm durante la aplicación, lo que permite que el fluido se extienda sobre el sustrato. Después de aplicar el depósito de PR, es común acelerar a una velocidad relativamente alta para reducir el espesor del fluido hasta casi su grosor final deseado. Las velocidades típicas de giro para este paso varían entre 1500 y 6000 rpm, dependiendo de las propiedades del fluido (principalmente su viscosidad), así como del sustrato.

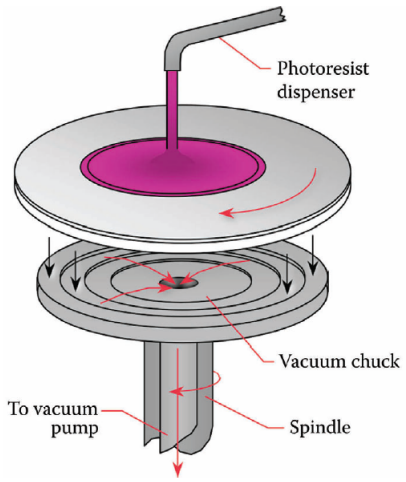


Figura 4.9: Depósito de fotoresina mediante la técnica *spin coating*. Fuente: Madou 2011 [35]

Este paso puede tardar desde 10 segundos hasta varios minutos. La combinación de velocidad de centrifugado y tiempo seleccionada para este paso generalmente definirá el espesor final de la película. A estas velocidades, la fuerza centrífuga hace que la solución fluya hacia los bordes (efecto borde), donde se acumula hasta ser expulsada cuando se excede la tensión superficial. El espesor del polímero resultante, T, es función de la velocidad de giro, la concentración de la solución y el peso molecular (medido por la viscosidad intrínseca). La expresión empírica de T viene dada por:

$$T = \frac{KC^{\beta}\eta^{\gamma}}{\omega^{\alpha}} \tag{4.3}$$

donde:

- K = la constante de calibración general
- C = la concentración de polímero en g/100 mL de solución
- η = la viscosidad intrínseca
- ω = el número de rotaciones por minuto

Una vez que se han identificado los factores clave (α, β, y γ), podemos usar la ecuación 4.3 para predecir el grosor de la película. Esta ecuación se aplica a diferentes pesos moleculares y concentraciones de solución de un polímero en un solvente específico.[37]. El proceso de depósito de fotoresinas es de primordial importancia en la eficacia de la transferencia de patrones. La calidad del revestimiento fotoproctector determina la densidad de los defectos transferidos al dispositivo en construcción.

En general, las fotoresinas se diluyen en algún solvente para controlar viscosidad. El uso de solventes con alto punto de ebullición en los que se disuelve la fotoresina, asegura que la fotoresina mantenga una viscosidad baja durante la aplicación por *spin-coating* y durante un tiempo suficiente después de diluirla, lo que permite obtener una película con un espesor uniforme sobre todo el sustrato, facilitando un recubrimiento gradual lateral en una escala que va desde micrómetros hasta milímetros. Además, el alto punto de ebullición y la baja presión de vapor a temperatura ambiente evitan la evaporación rápida en los recipientes abiertos de fotoresinas, así como durante su dispensación. Todo esto asegura un proceso de trabajo reproducible y seguro.

El solvente de la mayoría de las fotoresinas de la familiza AZ es PGMEA, y su punto de ebullición es 148°C, que en general se lo usa como un diluyente o para

la eliminación del exceso de bordes (efecto borde), comercialmente se distribuye como AZ EBR. Para las fotoresinas 701 MIR, los solventes que se utilizan son el acetato de butilo, con un punto de ebullición en 127°C.

Dependiendo de la viscosidad ajustada en la fotoresina, el solvente puede representar aproximadamente entre 55 % a 85 % en estado líquido de la resistencia y además sigue presente en la película fotoresistente con aprox. 2 % - 5 % después del horneado suave (*softbaking*).

4.3.6. Exposición UV.

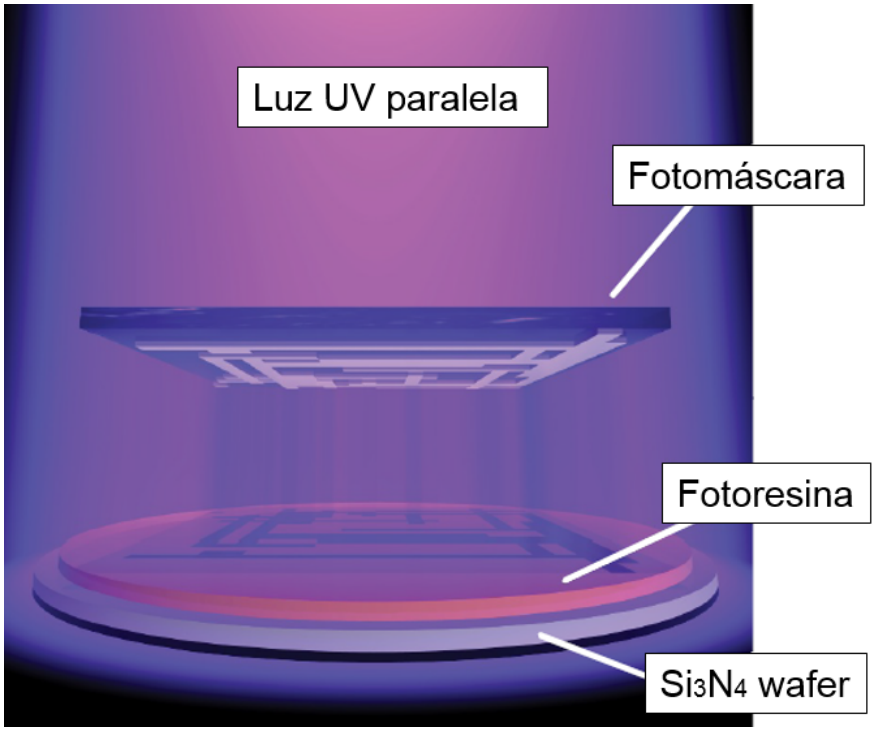


Figura 4.10: Exposición de una oblea recubierta de fotoresina con una fuente de luz ultravioleta.

Después del *softbaking*, las obleas recubiertas de resina se transfieren a un sistema de iluminación o exposición donde se alinean con las características de la máscara como se muestra en la Figura 4.10). Para que cualquier técnica litográfica sea valiosa, debe proporcionar una técnica de alineación capaz de una precisión de superposición de máscara y oblea que sea una pequeña fracción del tamaño mínimo de los dispositivos en construcción. En el caso más sencillo, un sistema de exposición consiste en una lámpara UV que ilumina la oblea recubierta a través de una máscara sin lentes entre ambas. El propósito de la iluminación es entregar luz con la intensidad, direccionalidad, características espectrales y uniformidad adecuadas a través de la oblea, permitiendo una transferencia o impresión casi

perfecta de la imagen de la máscara sobre la resistencia en forma de imagen latente.

La absorción óptica y, por lo tanto, la sensibilidad espectral de nuestras fotoresinas en su estado "no expuesto", se extiende desde longitudes de onda muy cortas de UV extremo (10 a 14 nm) hasta UV profundo (150 a 300 nm) y UV cercano (350 a 500 nm). En condiciones ultravioleta cercanas, normalmente se utiliza la línea g (435 nm) o la línea i (365 nm) de una lámpara de mercurio (ver Figura 4.11) , esto da como resultado la típica apariencia rojiza-marrón de las capas de algunos μm que se depositan sobre la oblea.

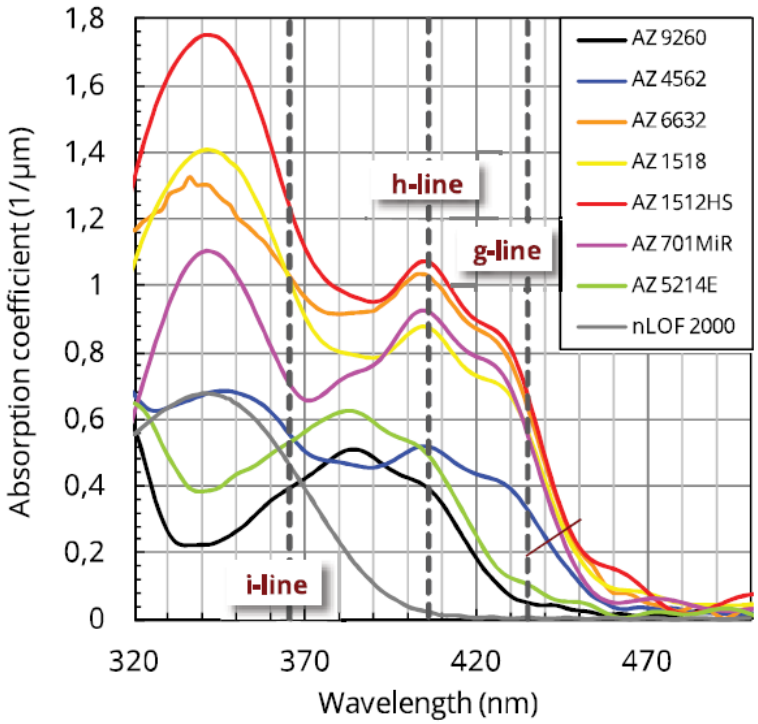


Figura 4.11: El espectro de absorción de las películas fotorresistentes no expuestas, dependen de la naturaleza y concentración del fotoiniciador utilizado. Fuente: MicroChemicals, Application notes: Photoresist composition and properties [36].

La intensidad de la luz incidente (en W/cm2) multiplicada por el tiempo de exposición (en segundos), da la energía incidente (J/cm2) o dosis, D, a través de la superficie de la película protectora. La radiación induce una reacción química en las áreas expuestas del fotorresistente, alterando la solubilidad del resistente en un disolvente, ya sea directa o indirectamente a través de un fotoiniciador.

El contenido de fotoiniciador de las fotoresinas típicas da como resultado un coeficiente de absorción en el rango de sensibilidad máxima de aproximadamente 1 - 2 μ m^{-1}, lo que teóricamente haría imposible exponer películas fotorresistentes gruesas.

Sin embargo, durante la exposición mediante la conversión del fotoiniciador, el coeficiente de absorción disminuye en órdenes de magnitud: el fotoiniciador de la fotoresina suele blanquearse; en otras palabras, la resistencia expuesta se vuelve muy transparente a las longitudes de onda entrantes que están por debajo de 440 nm (Figura 4.12). Este blanqueo permite el uso de películas gruesas con alta absorbancia porque la luz llegará al sustrato a través de la resistencia blanqueada.

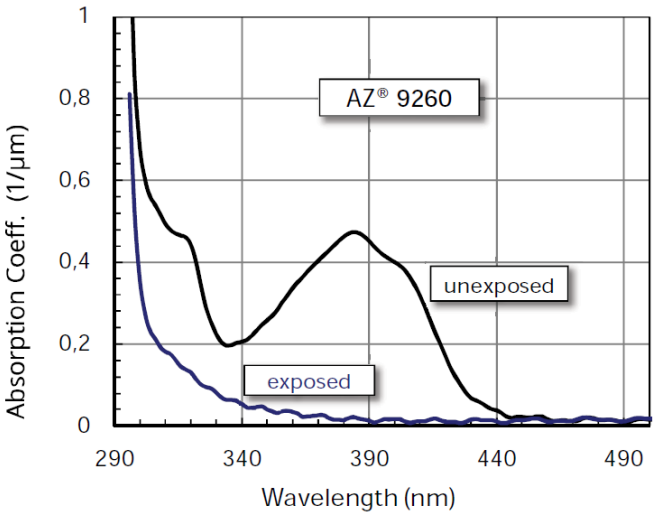


Figura 4.12: El espectro de absorción del AZ 9260 antes (negro-*unexposed*) y después (azul-*exposed*) de la exposición. Fuente: MicroChemicals, Application notes: Exposure of Photoresists [38].

Caracterización: En principio, se recomienda realizar una serie de exposiciones para optimizar el proceso, especialmente cuando se introduce un nuevo proceso o se cambian equipos o fotorresistencias, para determinar la dosis de luz óptima. Esto dependerá del fotorresistente, las propiedades del sustrato óptico y los requisitos del proceso. Para resistencias positivas, la dosis óptima es aquella en la que la tasa de revelado comienza a saturarse y no aumenta con dosis mayores, lo que corresponde a la conversión total del fotoiniciador. La Figura 4.13 muestra la tasa de revelado de la fotoresina positiva AZ1518 en función de la duración o dosis de la exposición UV. La fotoresina fue depositada por rotación *spin coating* a 4000 rpm, se la horneó/cocinó (*baked*) a 100 °C en un *hot plate* durante 1 minuto por μm de espesor de la película fotorresistente, y se revelaron (por inmersión) después de la exposición en AZ 826 MIF . La imagen se

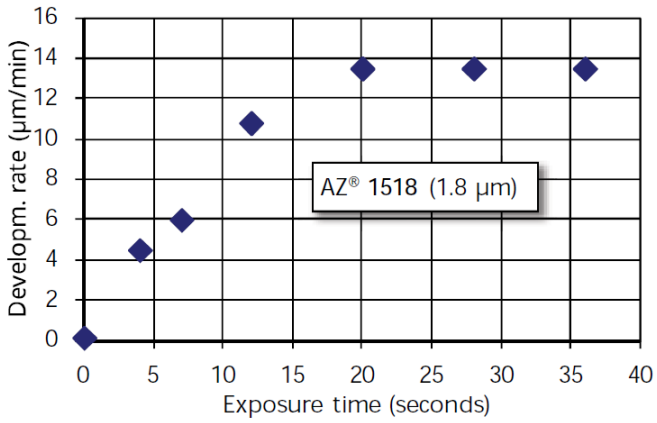


Figura 4.13: La tasa de revelado de la fotoresina aumenta inicialmente con una dosis creciente de exposición, luego se satura a un valor que depende del fotoprotector, el revelador y los parámetros del proceso anterior, como el horneado suave (*softbake*) y la rehidratación. Fuente: MicroChemicals, Application notes: Exposure of Photoresists [38].

expuso utilizando un alineador de máscaras con una lámpara de 350 W Hg a una intensidad i-line de 8,5 mW/cm2 y aprox. 22 mW/cm2 integrado sobre las líneas g-, h- e i-.

4.3.7. Revelado.

Después de la exposición, los patrones de la máscara protectora aparece como imagen latente en la fotoresina: las zonas expuestas se diferencian químicamente de las zonas no expuestas. El propósito del revelador es disolver las áreas de resistencia expuestas (ver Figura 4.5(d)) (en el caso de resistencias positivas) o no expuestas (en el caso de resistencias negativas), dando como resultado las estructuras de resistencia finales deseadas [39]. Entonces se forma una imagen en relieve que servirá como máscara para pasos adicionales de sustracción y adición. Existen dos tecnologías principales para el revelado: el revelado húmedo, que se utiliza ampliamente en la fabricación de circuitos y miniaturización en general, y el revelado en seco, que está comenzando a reemplazar al revelado húmedo en algunas aplicaciones de resolución de línea de alta precisión. Se utilizan dos tipos principales de configuraciones de revelado húmedo: inmersión y reveladores por *spray* . Durante el revelado por inmersión en lote, las obleas se sumergen en lotes durante un período de tiempo determinado en un baño de revelador y se agitan a una temperatura específica. Durante el revelado por *spray*, los pulverizadores tipo abanico (*fan*) dirigen la solución de revelado fresca a través de las superficies de las obleas. En este trabajo se utilizó el revelado húmedo por inmersión.

Las resistencias positivas se desarrollan típicamente en soluciones alcalinas acuosas, y las resistencias negativas se desarrollan en soluciones orgánicas. Para los reveladores alcalinos, se pueden usar soluciones simples de NaOH (AZ 351B) o KOH (AZ/Clariant 400K), pero debido a la posibilidad de contaminación por iones móviles en dispositivos semiconductores de óxido metálico (MOS), se prefieren los reveladores libres de iones metálicos. Cada revelador tiene una dilución diferente, y algunos requieren tiempos de revelado más largos que otros. Los reveladores generalmente están emparejados con un tipo de fotoresina. Aunque pueden ser intercambiables hasta cierto punto, cambiar el tipo de revelador usado en un proceso usualmente cambiará el tiempo de exposición necesario para resolver el patrón.

El revelado acuoso es muy favorecido por razones de salud. La tasa de revelado acuoso depende del pH del revelador y de la temperatura, que necesita ser controlada dentro de $\pm 0.5°C$. Los tensioactivos (que reducen de tensión superficial) y otros agentes humectantes añadidos al revelador aseguran una humectación uni-

forme, y los amortiguadores (que resisten cambios en el pH cuando se añaden ácidos) proporcionan un entorno operativo más estable con una vida útil más larga.

4.3.8. *Dry Etching.*

Después de completar los procesos de litografía, el paso final implica definir las estructuras de los dispositivos integrados mediante técnicas de ataque físico o químico, conocidas como *dry etching*. En esta tesis doctoral, se utilizó específicamente la técnica *Reactive Ion Etching* (RIE), por lo que se explorará en detalle esta técnica.

El *Dry Etching* (grabado en seco) es una técnica crucial en la fabricación de circuitos integrados y dispositivos de fotónica integrada. Permite el grabado de patrones con alta precisión y resolución, esencial para la miniaturización de los dispositivos [40]. El *Dry Etching* es un proceso en el que los sustratos se graban sin usar productos químicos líquidos. En lugar de eso, entran y salen del sistema de grabado en un estado seco. El término "Dry Etching" abarca una familia de métodos en los cuales una superficie sólida se graba físicamente mediante bombardeo de iones en fase gaseosa o de vapor, químicamente a través de reacciones químicas en la superficie con especies reactivas, o mediante una combinación de ambos procesos (físicos y químicos), como en el grabado *Reactive Ion Etching (RIE)* [41].

A diferencia del *wet etching* (grabado en húmedo), el *dry etching* puede ser altamente anisotrópico (ver Figura 4.14), es decir, el grabado ocurre predominantemente en una dirección (vertical) [42], lo cual es crucial para obtener paredes rectas y perfiles bien definidos en las estructuras. Además, ofrece un control más fino sobre la tasa de grabado y la selectividad entre diferentes materiales, permitiendo trabajar con materiales más delicados o capas muy delgadas sin dañarlas. Otra de las características que ofrece, es que puede grabar en una amplia gama de materiales utilizados en semiconductores, como silicio, óxidos, nitruros, y compuestos III-V [43].

Tipos de *Dry Etching* mas comunes:

- *Plasma Etching*: Utiliza gases ionizados (plasma) para reaccionar químicamente con el material a grabar.
- *Reactive Ion Etching* (RIE):Combina la acción química del plasma con la acción física del bombardeo de iones para un grabado altamente direccional.

- *Deep Reactive Ion Etching* (DRIE): Una variante del RIE, especialmente diseñada para realizar grabados profundos con alta anisotropía, común en la fabricación de MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*).

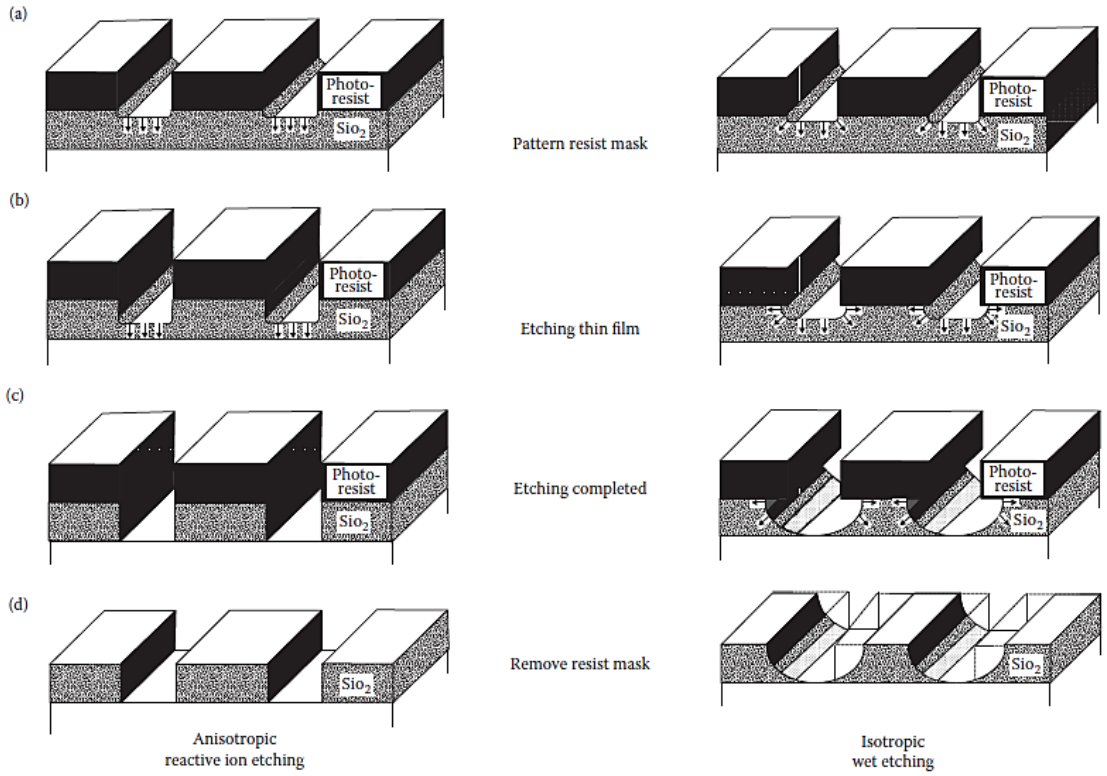


Figura 4.14: Comparación del grabado anisotrópico seco e isotrópico húmedo para modelar una película delgada de SiO_2. En el paso (a), la fotoresina protege partes del SiO_2 subyacente del ataque seco o húmedo. En los pasos (b) y (c), el grabado continúa hasta que se alcanza el sustrato de Si subyacente, excavando debajo de la foteresina en el grabado húmedo pero no en el grabado seco. En el paso (d) se quita la resistencia. Fuente: Madou 2011 [35].

Un elemento clave del *dry etching* es la creación de plasma. El *dry etching* asistido por plasma se clasifica según la configuración específica como: grabado por descarga luminosa (configuración de diodo) o *ion-beam etching* (configuración de triodo). Usando técnicas de descarga luminosa (*glow dischargue*), el plasma se genera en la misma parte de la cámara de vacío donde se encuentra el sustrato; Cuando se utilizan técnicas de *ion beam*, el plasma se genera en una cámara separada o en otra parte de la misma cámara de vacío de la cual se extraen los iones y se dirigen en un haz hacia el sustrato mediante una serie de rejillas de electrodos. También es común diferenciar entre las técnicas: 1) *sputter/ion etching* físico y *ion-beam etching (IBE)* o también *ion-beam milling* (IBM), 2) *plasma etching* químico (PE), y 3) el sinergético *reactive ion etching* (RIE).

***Reactive Ion Etching* - RIE.**

Utiliza un plasma de gases reactantes para eliminar material de una muestra. El plasma se genera mediante la aplicación de un campo eléctrico de alta frecuencia a baja presión en un reactor de plasma (Figura 4.15). Los iones y los radicales en el plasma reaccionan químicamente con el material de la muestra, lo que permite su eliminación selectiva. El grabado físico y el grabado químico son dos mecanismos principales que pueden ocurrir durante el proceso RIE. La diferencia principal entre ellos radica en los mecanismos dominantes que impulsan la eliminación del material de la muestra.

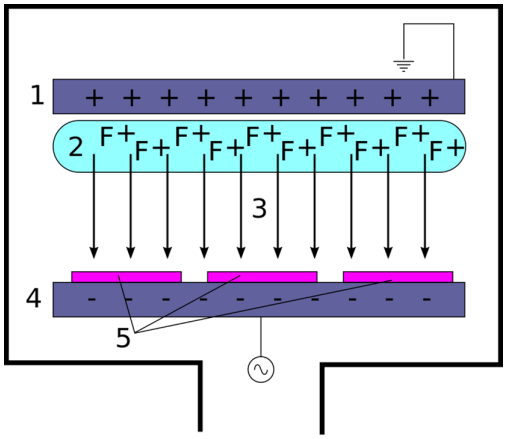


Figura 4.15: Diagrama con configuración RIE. Un RIE consta de dos electrodos (1 y 4) que crean un campo eléctrico (3) destinado a acelerar los iones (2) hacia la superficie de las muestras (5).

Grabado Físico: La eliminación del material se produce principalmente debido a la acción física de los iones del plasma. Los iones cargados bombardean la superficie del sustrato a alta energía, lo que provoca la expulsión de átomos y moléculas de la superficie. Este proceso es similar a la erosión, donde la energía cinética de las partículas del plasma causa la remoción de material sin reacciones químicas significativas.

Grabado Químico: El grabado químico implica la eliminación del material mediante reacciones químicas entre los gases del plasma y la superficie del sustrato. Estas reacciones pueden disolver o volatilizar el material, permitiendo una eliminación selectiva y precisa. La selectividad se logra mediante reacciones específicas para ciertos materiales, lo que permite grabar capas diferentes de forma selectiva en una muestra.

Tasa de grabado.

También conocida como velocidad de grabado o velocidad de erosión, en el proceso RIE se puede determinar mediante ecuación general:

$$R = K * P^n \tag{4.4}$$

donde:

- - R es la tasa de grabado en unidades de profundidad por unidad de tiempo [nm/s].

- - K es una constante de proporcionalidad que depende de varios factores, como la composición del plasma, la presión, la potencia de RF, etc.
- - P es la densidad de potencia del plasma, que es la potencia por unidad de área aplicada al sustrato.
- - n es el exponente de la densidad de potencia, que generalmente está entre 0.5 y 1.

Entonces, la ecuación 4.4 representa una fórmula general utilizada para describir la tasa de grabado (R) en procesos de grabado iónico reactivo (RIE). El razonamiento detrás de esta ecuación proviene de los principios fundamentales de la interacción plasma-sustrato en un sistema de grabado iónico reactivo [44].

Finalmente, en la Figura 4.16 se muestra un sistema típico de RIE, que consiste en una cámara de vacío cilíndrica con un plato de obleas en la parte inferior. El plato está aislado eléctricamente. El gas entra por la parte superior y sale por abajo mediante una bomba de vacío. Se utilizan diferentes gases según el proceso de grabado, como el hexafluoruro de azufre (SF_6) para grabar silicio. La presión del gas se controla ajustando las tasas de flujo y un orificio de escape.

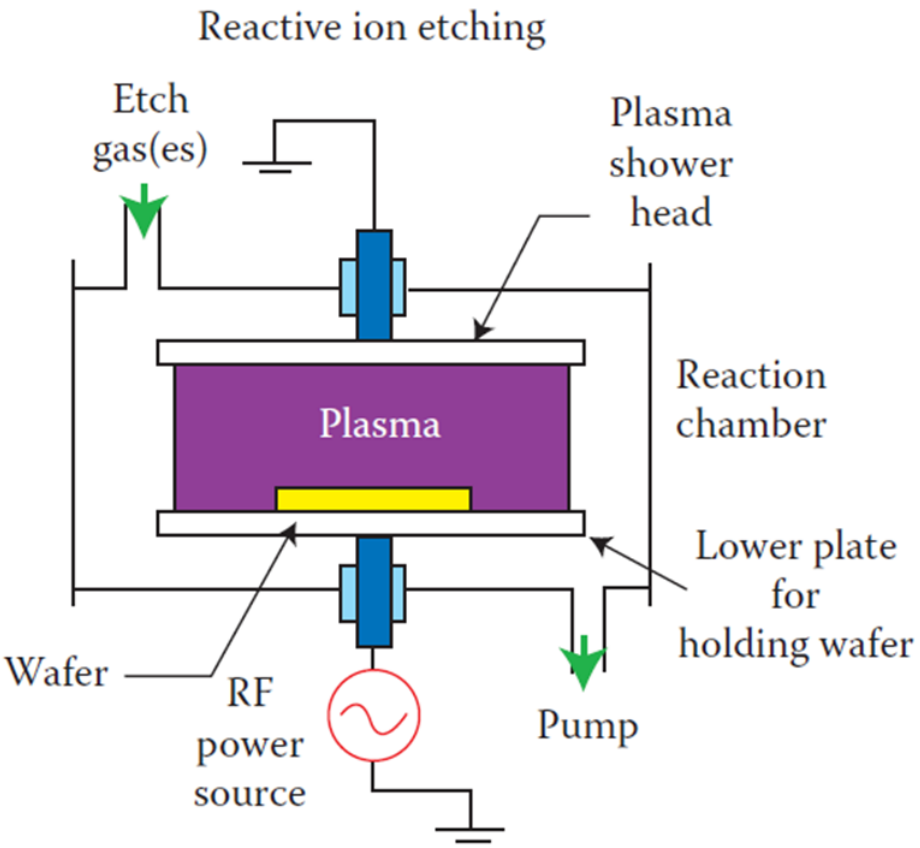


Figura 4.16: Esquema de un equipo RIE. Fuente: Madou 2011 [35].

Referencias

[1] E. L. Wooten et al. «A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems». En: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 6.1 (2000), págs. 69-82.

[2] Y. Inoue et al. «Silica-based arrayed-waveguide grating circuit as optical splitter/router». En: *Electronics Letters* 31.9 (1995), págs. 726-727.

[3] C. R. Doerr, L. Zhang y P. J. Winzer. «Monolithic InP multiwavelength coherent receiver using a chirped arrayed waveguide grating». En: *Journal of Lightwave Technology* 29.4 (2011), págs. 536-541. DOI: 10.1109/JLT.2011.2105547.

[4] D. Dai et al. «Low-loss Si3N4 arrayed-waveguide grating (de) multiplexer using nano-core optical waveguides». En: *Optics Express* 19.15 (2011), págs. 14130-14136.

[5] D. Feng et al. «Fabrication insensitive echelle grating in silicon-on-insulator platform». En: *IEEE Photonics Technology Letters* 23.5 (2011), págs. 284-286.

[6] A. Malik et al. «Germanium-on-silicon mid-infrared arrayed waveguide grating multiplexers». En: *IEEE Photonics Technology Letters* 25.18 (2013), págs. 1805-1808.

[7] A. E.-J. Lim et al. «Review of silicon photonics foundry efforts». En: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 20.4 (2014), págs. 405-416.

[8] E. Ryckeboer et al. «Silicon-on-insulator spectrometers with integrated GaInAsSb photodiodes for wide-band spectroscopy from 1510 to 2300 nm». En: *Opt. Express* 21.5 (2013), págs. 6101-6108. DOI: 10.1364/OE.21.006101.

[9] Hongtao Lin et al. «Mid-infrared integrated photonics on silicon: a perspective». En: *Nanophotonics* 7.2 (2018), págs. 393-420. DOI: 10.1515/nanoph-2017-0085. URL: https://doi.org/10.1515/nanoph-2017-0085.

[10] M. Smit et al. «An introduction to InP-based generic integration technology». En: *Semiconductor Science and Technology* 29.8 (2014), pág. 083001.

[11] A. Leinse et al. «Triplex waveguide platform: low-loss technology over a wide wavelength range». En: *SPIE Microtechnologies*. International Society for Optics y Photonics. 2013, 87670E-87670E.

[12] D. Domenech et al. «Generic silicon nitride foundry development: Open access to low cost photonic integrated circuits prototyping». En: *Proc. of the 9th Spanish Opto-electronics Conference (OPTOEL)*. 2015.

[13] Michael L. Cooper, Greeshma Gupta, William M. Green et al. «235-Ring coupled-resonator optical waveguides». En: *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*. cit. on p. 368. IEEE, 2010.

[14] W. A. Zortman, D. C. Trotter y M. R. Watts. «Silicon photonics manufacturing». En: *Optics Express* 18.23 (2010). cit. on p. 368, págs. 23598-23607.

[15] A. V. Krishnamoorthy, Xuezhe Zheng, Guoliang Li et al. «Exploiting CMOS manufacturing to reduce tuning requirements for resonant optical devices». En: *IEEE Photonics Journal* 3.3 (2011). cit. on p. 368, págs. 567-579. DOI: 10.1109/JPHOT.2011.2140367.

[16] Lukas Chrostowski y Michael Hochberg. *Silicon Photonics Design: From Devices to Systems*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2015.

[17] Yun Wang et al. «Universal grating coupler design». En: *Proc. SPIE*. Vol. 8915. cit. on pp. 168, 170. 2013, 89150Y. DOI: 10.1117/12.2042185.

[18] William Whyte. *Cleanroom technology: fundamentals of design, testing and operation*. John Wiley & Sons, 2010.

[19] M. J. Shaw et al. «Fabrication techniques for low-loss silicon nitride waveguides». En: *Proceedings of the Photonics West 2005*. [Google Scholar]. SPIE. San Jose, CA, USA: SPIE, 2005, págs. 109-118.

[20] Marc J. Madou. *Fundamentals of Microfabrication: The science of the miniaturization*. Second edition. CRC Press, 2002.

[21] Sulabha K. Kulkarni. *Nanotechnology: Principles and Practices*. 3er Edition. Springer, 2015. Cap. 3.5.

[22] Marc J. Madou. *Fundamentals of Microfabrication: Manufacturing Techniques for Microfabrication and Nanotechnlogy*. Vol. II. Third edition. CRC Press, 2012.

[23] R. D. Compton. «PECVD a versatile technology». En: *Semiconductor Int* (1992), págs. 60-65.

[24] D. W Hess y Eds. K.f. Jensen. *Microelectronics Processing*. American Chemical Society, 1989.

[25] Ed. S. M. Sze. *VLSI Technology*. McGraw-Hill, 1988.

[26] R. Pool. «Microscopic Motor Is a First Step». En: *Res. News* (1988), págs. 80-379.

[27] W. Kern y D. A. Puotinen. «Deposition of Silicon Nitride Films from Silane and Ammonia in a Low Pressure Reactor». En: *Journal of the Electrochemical Society* 117.3 (1970), págs. 434-438.

[28] J. Robertson. «Plasma Deposition of Amorphous Silicon-Based Materials». En: *Materials Science and Engineering: R: Reports* 37.4-6 (2002), págs. 129-281.

[29] T. A. Brunner et al. «Laser bandwidth and other sources of focus blur in lithography». En: *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS* 5.4 (2006), págs. 5-7. DOI: 10.1117/1-2396926. URL: https://doi.org/10.1117/1-2396926.

[30] R. Rokitski et al. «High power 120 W ArF immersion XLR laser system for high dose applications». En: vol. 8683. 2013, págs. 8683-8683-7. DOI: 10.1117/12.2012681. URL: https://doi.org/10.1117/12.2012681.

[31] A. E. Rosenbluth et al. «Optimum mask and source patterns to print a given shape». En: *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS* 1 (2002), págs. 1-18. DOI: 10.1117/1-1448500. URL: https://doi.org/10.1117/1-1448500.

[32] Joseph W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics*. San Francisco, CA: McGraw-Hill, 1968.

[33] Francis A. Jenkins y Harvey E. White. *Fundamentals of Optics*. New York: McGraw-Hill, 1957.

[34] Bruce W. Smith y Kazuaki Suzuki. *Microlithography: Science and Technology*. 3rd. CRC Press, 2020. ISBN: 9781439876756. DOI: 10.1201/9781351643443. URL: https://www.routledge.com/Microlithography-Science-and-Technology/Smith-Suzuki/p/book/9781439876756.

[35] Marc J. Madou. *Fundamentals of Microfabrication and Nanotechnology*. CRC Press, 2011.

[36] MicroChemicals GmbH. *Photoresists: Composition, Properties and Applications*. Accessed: 2024-07-10. 2011. URL: https://www.microchemicals.com/dokumente/application_notes/photoresists_composition_properties.pdf.

[37] L. F. Thompson. *Introduction to Microlithography*. Ed. por L. F. Thompson, C. G. Willson y M. J. Bowden. Washington, DC: American Chemical Society, 1994.

[38] MicroChemicals GmbH. *Exposure of Photoresists*. Accessed: 2024-07-11. 2023. URL: https://www.microchemicals.com/dokumente/application_notes/exposure_photoresist.pdf (visitado 11-07-2024).

[39] MicroChemicals. *Development of Photoresist*. Accessed: 2024-07-11. 2024. URL: https://www.microchemicals.com/dokumente/application_notes/development_photoresist.pdf.

[40] Stanley Wolf y Richard N Tauber. *Silicon Processing for the VLSI Era, Vol. 1: Process Technology*. Capítulo 6: Plasma Etching. Lattice Press, 2000.

[41] Simon M Sze y Kwok K Ng. *Physics of Semiconductor Devices*. 3.ª ed. Sección sobre técnicas de grabado en semiconductores. John Wiley & Sons, 2007.

[42] Stephen A Campbell. *The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication*. 2.ª ed. Capítulo 12: Dry Etching. Oxford University Press, 2008.

[43] Marc J Madou. *Manufacturing Techniques for Microfabrication and Nanotechnology*. 3.ª ed. Capítulo 4: Plasma-Based Etching. CRC Press, 2011.

[44] Michael A Lieberman y Allan J Lichtenberg. *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. Wiley-Interscience, 2005.

Capítulo 5

Técnicas de acoplamiento óptico.

Índice

5.1. Interfaces eléctricas. 139
5.1.1. Bond pads. 139
5.2. El desafío tecnológico de acoplamiento óptico en chips fotónicos. . 139
5.3. *Grating couplers.* 140
5.3.1. Teoría. 143
5.3.2. Diseño y simulaciones 145
5.4. *Edge Couplers.* 147
5.4.1. Fibras individuales. 147
5.4.2. Convertidores del tamaño del spot. 147
5.4.3. Acoplador de borde tipo *Nano-taper* 148

La principal consideración al probar y empaquetar chips fotónicos de silicio es el método de conexión a los chips. Esto implica conexiones tanto ópticas como eléctricas. En este capítulo, describimos los métodos ópticos comunes para proporcionar conectividad de entrada-salida (IO) en chips fotónicos. Las técnicas ópticas que se utilizaron en esta tesis y que vamos a introducir en este capítulo son: "*fiber grating couplers*" y "*edge couplers*" (Figura 5.1).

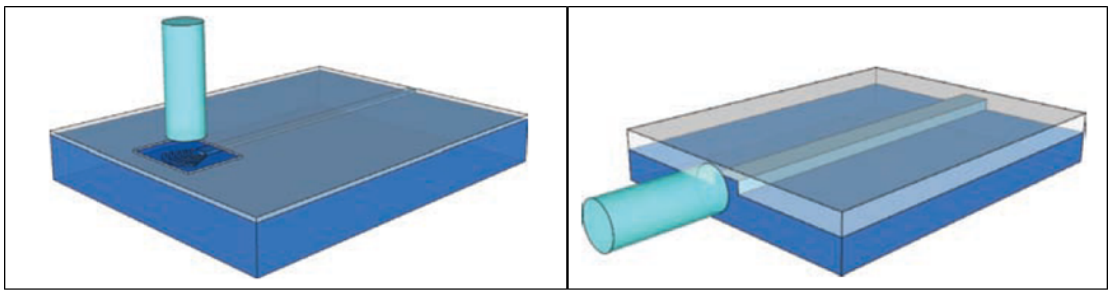


Figura 5.1: Izquierda: Acoplamiento vertical *fiber-on-chip* mediante *grating couplers*. Derecha: Acoplamiento por borde (*edge coupled*) *fiber-on-chip* hacia una guía de onda.

5.1. Interfaces eléctricas.

Las conexiones eléctricas pueden ser temporales para pruebas (por ejemplo, sondas) o permanentes para la integración del sistema (por ejemplo, conexiones con cable).

5.1.1. Bond pads.

Las conexiones a los circuitos eléctricos se realizan mediante *bond pads*, que son áreas metalizadas en la superficie del chip. Por lo general, son cuadrados, dibujados en la última capa del chip. El tamaño del *pad* puede variar de 25 a 100 μm. El tamaño del *pad* debe elegirse en función de la técnica utilizada para conectarla. Los *bond pads* suelen estar hechos de aluminio y tienen una capacitancia normalmente pequeña (por ejemplo, 30 fF), que debe tenerse en cuenta durante el modelado del circuito.

5.2. El desafío tecnológico de acoplamiento óptico en chips fotónicos.

Debido al gran contraste del índice de refracción entre el núcleo de silicio (n= 3.47 a 1550 nm) y el revestimiento de dióxido de silicio (n = 1,444 a 1550 nm), los modos de propagación están muy confinados dentro de la guías de onda con dimensiones del orden de unos pocos cientos de nanómetros. Aunque es un beneficio para la integración a gran escala, el pequeño tamaño característico de las guías de onda plantea el problema de una gran falta de coincidencia entre el modo óptico dentro de una fibra óptica y el modo dentro de las guías de onda [1]. El área de la sección transversal de un núcleo de fibra óptica (con un diámetro de 9 μm) es casi 600 veces mayor que la de una guía de ondas de silicio (con dimensiones de 500 nm $\times$ 220 nm), en consecuencia, requiere de componentes que ajusten gradualmente el diámetro del campo modal.

Se han demostrado varios enfoques para abordar el problema de la falta de coincidencia de modos antes mencionada. El acoplamiento de borde (*edge coupling*) utilizando convertidores de tamaño puntual y fibras con lentes es una solución utilizada para abordar este problema, y se ha demostrado un acoplamiento de alta eficiencia con una pérdida de inserción inferior a 0,5 dB [2]. Además, las polarizaciones TE y TM se pueden acoplar de manera eficiente. Sin embargo, este enfoque sólo se puede utilizar en el borde de los chips, y la implementación de

tales diseños requiere posprocesos complejos (corte, pulido de cantos) y alineación óptica de alta resolución, lo que aumenta el costo de ensamblaje.

Los *grating couplers* son una solución alternativa para abordar el problema de la falta de coincidencia de modos. En comparación con el acoplamiento de borde, los *grating couplers* tienen varias ventajas: la alineación con *grating couplers* durante la medición es mucho más fácil que la alineación con los *edge couplers* (acopladores de borde); la fabricación de *grating couplers* no requiere posprocesamiento, lo que reduce el costo de fabricación; Los *grating couplers* se pueden colocar en cualquier parte de un chip, lo que proporciona flexibilidad en el diseño y permite realizar pruebas automatizadas a escala de oblea. Tanto grupos de investigación académicos como industriales han demostrado *grating couplers* de alta eficiencia; pérdidas de acoplamiento del orden de 1 dB es posible [3] [4]. También se han demostrado *grating couplers* que pueden dividir la polarización [5].

5.3. *Grating couplers.*

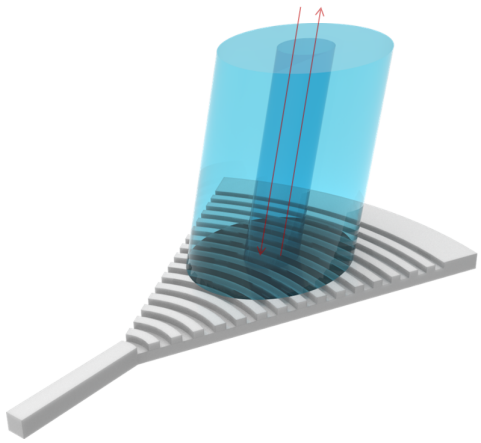


Figura 5.2: Grating coupler y fibra óptica.

Un *grating coupler* es una estructura periódica que puede difractar la luz desde la propagación en la guía de onda (en el plano) al espacio libre (fuera del plano). Normalmente se utiliza como un dispositivo de entrada/salida para acoplar la luz entre fibra (o espacio libre) y guías de onda SOI submicrométricas (ver Figura 5.2). La Figura 5.3 es un diagrama de sección transversal de un diseño de un *grating coupler* de grabado superficial en una oblea de silicio sobre aislante (SOI). El grosor de la capa funcional de Si y el grosor de la capa de óxido enterrado (BOX) están determinados por el tipo de oblea. Generalmente se emplea una capa de recubrimiento para proteger la capa funcional de silicio y permitir la fabricación de interconexiones eléctricas de múltiples capas. En algunas aplicaciones (por ejemplo, sensores de campo evanescente), el recubrimiento es aire o líquido. En la Figura 5.3 se describen los parámetros de diseño.

- El acoplador consiste en un núcleo de guía de onda de silicio, un recubrimiento superior (óxido o aire), un recubrimiento inferior (óxido enterrado, BOX) y

un sustrato (silicio). El índice efectivo de la guía de onda plana es n_{eff};

- Λ es el período del *grating* o de la red;
- W es el ancho de la estrcutura del *grating* (asumiendo un *grating* uniforme);
- ff es el factor de llenado (o ciclo de trabajo) y se define como $ff = W/\Lambda$;
- ed es la profundidad de grabado del *grating*; y
- θ_c es el ángulo entre la normal a la superficie y la dirección de propagación de la luz difractada, en el recubrimiento.
- θ_{air} es el ángulo entre la normal a la superficie y la dirección de propagación de la luz difractada, en el aire.
- θ_{fibre} es el ángulo entre la normal a la superficie y la dirección de propagación de la luz difractada, en la fibra. Esto corresponde al ángulo de pulido de la fibra.

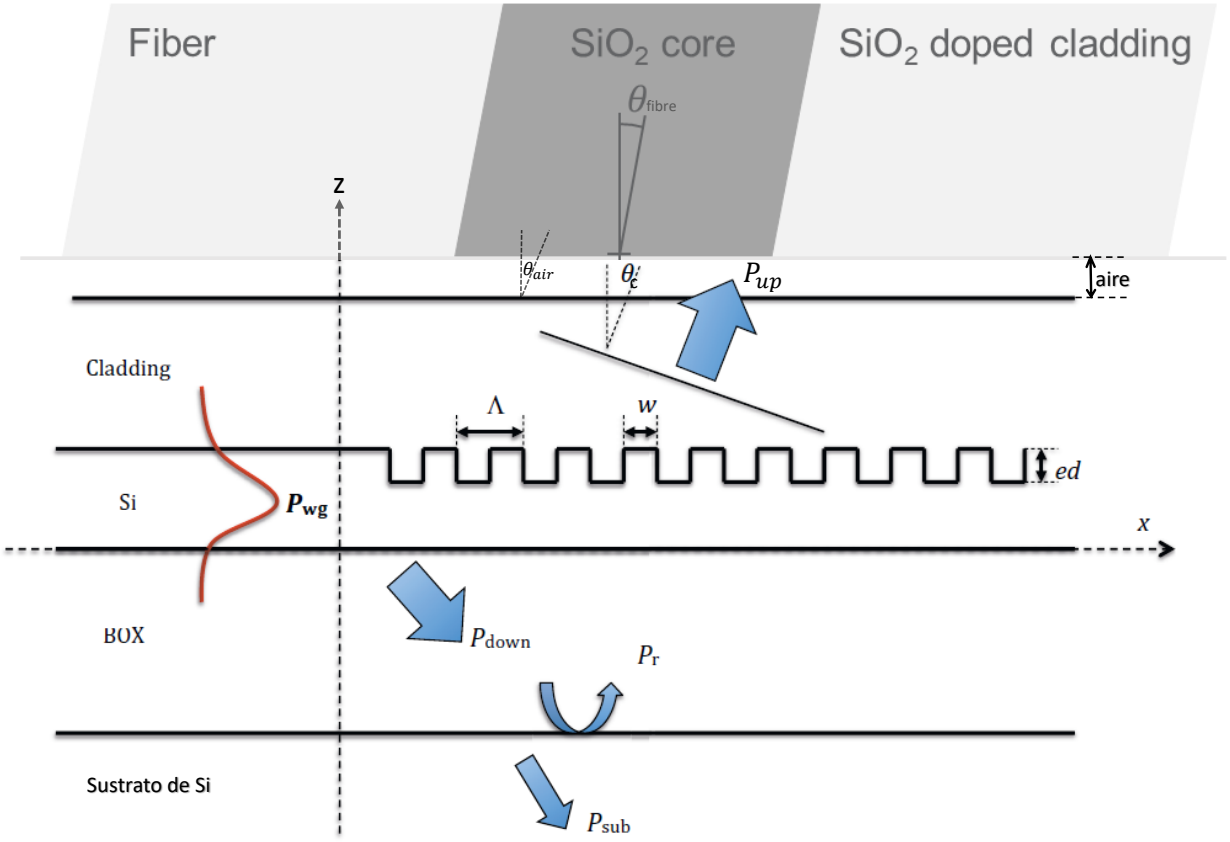


Figura 5.3: Diagrama esquemático de la sección transversal de un *grating coupler* de salida. Adaptado de Chrostowski 2015 [1]

En consideración del *grating coupler* de salida, P_{wg} es la potencia óptica de la luz de entrada; P_{up} y P_{down} indican la potencia que sube y la potencia que penetra hacia abajo en la oblea. No se muestra la fibra óptica, y la potencia que se acopla a su modo fundamental, P_{fibre}.

El rendimiento del *grating coupler* se puede describir mediante los siguientes parámetros:

1. **Direccionalidad**: la proporción entre la potencia difractada hacia arriba (P_{up}) y la potencia de entrada desde la guía de onda (P_{wg}), que suele expresarse en decibelios (dB) como $10\log_{10}(P_{up}/P_{wg})$.

2. **Pérdida de inserción (eficiencia de acoplamiento)**: la proporción entre la potencia acoplada al modo fundamental de la fibra (P_{fibre}) y la potencia de entrada desde la guía de onda (P_{wg}). Suele expresarse en decibelios (dB), y la pérdida de inserción se puede expresar como $IL = 10\log_{10}(P_{fibre}/P_{wg})$.

3. **Pérdida de penetración**: la proporción entre la potencia perdida en el sustrato (P_{sub}) y la potencia de entrada desde la guía de onda, que es $10\log_{10}(P_{down}/P_{wg})$.

4. **Reflexión a la guía de onda**: debido al contraste del índice de refracción entre la guía de onda de silicio y el *grating*, parte de la luz de entrada desde la guía de onda será reflejada de nuevo a la guía de onda. La proporción entre la potencia reflejada y la potencia de entrada desde la guía de onda se llama reflexión hacia atrás a la guía de onda, o pérdida de retorno óptica. Suele expresarse en dB, como $10\log_{10}(P_{back-wg}/P_{wg})$. Esta reflexión hacia atrás no es deseada porque causará oscilaciones de Fabry-Perot al reflejarse de un lado a otro entre los *grating couplers* de entrada y salida [6] [7]; la supresión típica en el rango de 20–30 dB es deseada.

5. **Reflexión a la fibra**: para los *grating couplers* de entrada, parte de la luz de entrada será reflejada de nuevo a la fibra. También se denomina pérdida de retorno óptica (dB), y se calcula como $10\log_{10}(P_{back-fibre}/P_{in-fibre})$ para medirla. Esta reflexión no es deseada porque puede afectar la estabilidad de la fuente de luz.

6. **Ancho de banda de 1 dB o 3 dB**: el rango de longitud de onda en el cual la pérdida de inserción es 1 dB o 3 dB menor que la eficiencia de acoplamiento máxima.

5.3.1. Teoría.

Las Figuras 5.4 y 5.5 ilustran como operan los *grating coplers* de salida. Estos dispositivos pueden entenderse en términos del principio de Huygens-Fresnel, es decir, la interferencia constructiva y destructiva que surge de los frentes de onda creados por la difracción de la luz en la estructura del *grating*.

En el caso que la longitud de onda óptica dentro del *grating* coincide con su período ($\lambda/n_{eff} = \Lambda$, ver Figura 5.4), la difracción de primer orden se propagará verticalmente (indicada por la línea verde) y una difracción de segundo orden se propagará de regreso a la guía de onda (línea roja). En la práctica, la retro-reflexión no es deseada porque puede provocar una oscilación de Fabry-Perot entre el acoplador de entrada y el acoplador de salida. Para evitar la difracción de segundo orden hacia la guía de onda, se desajusta el *grating* y la fibra tiene un pequeño ángulo con respecto a la normal de la superficie del *grating*. En el caso en el que la longitud de onda óptica dentro del *grating* es menor que el período del grating ($\lambda/n_{eff} < \Lambda$, ver Figura 5.5). Entonces la onda de salida se propagará en un ángulo y en este caso no existe ninguna reflexión de segundo orden.

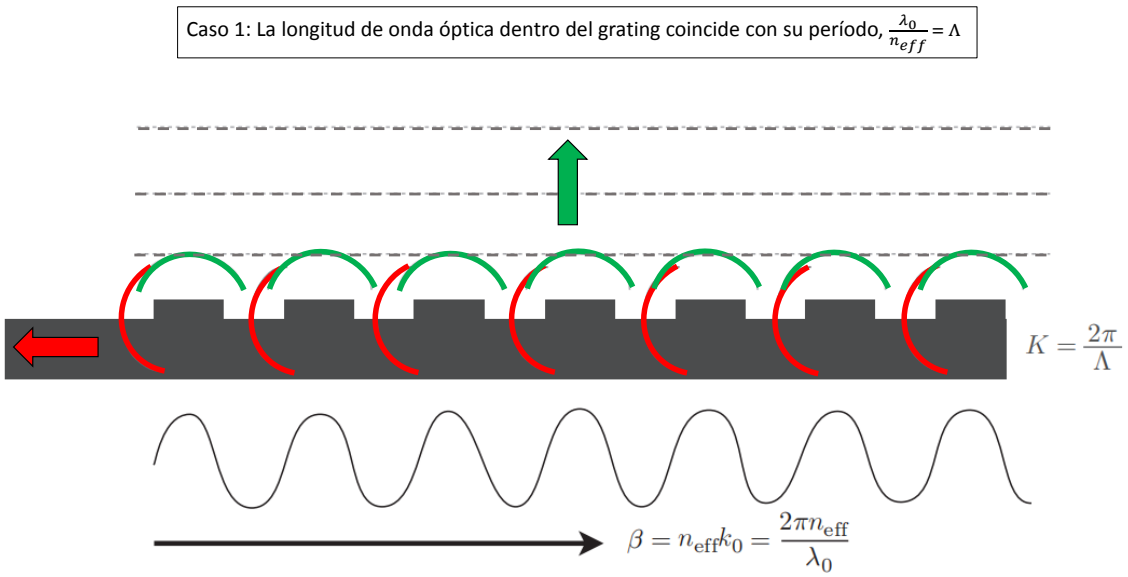


Figura 5.4: Diagrama 1 que ilustra el concepto de un *grating coupler* de salida. La luz incide en la guía de ondas desde la izquierda, con salida hacia arriba (en este caso, en el aire). La salida vertical (primer orden de difracción en verde) y la retro-reflexión (segundo orden de difracción en rojo). Adaptado de Chrostowski 2015 [1]

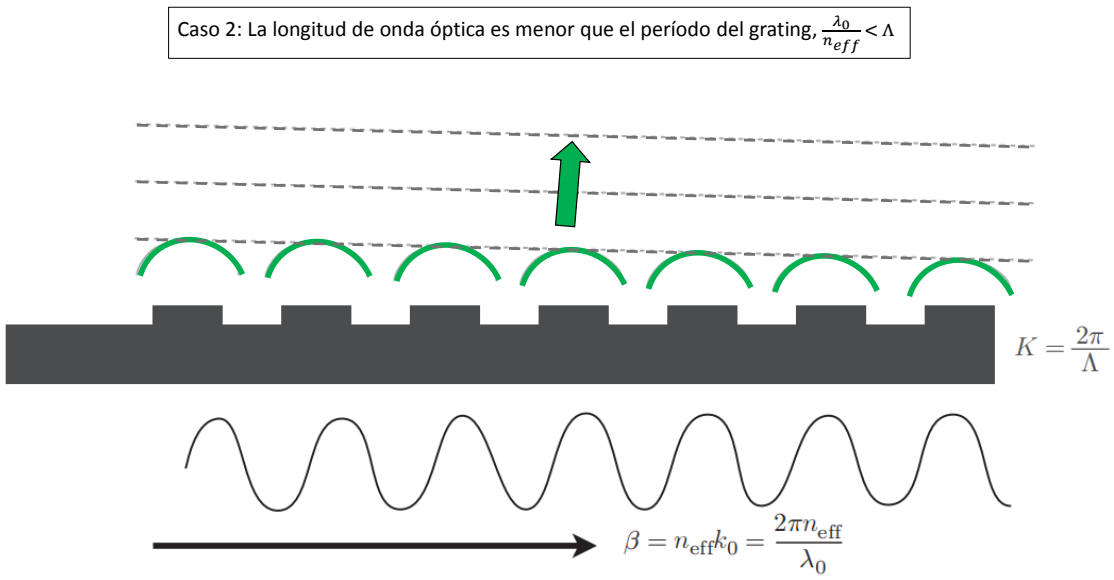


Figura 5.5: Diagrama que ilustra el concepto de un *grating coupler* de salida. La luz incide en la guía de ondas desde la izquierda, con salida hacia arriba (en este caso, en el aire). La salida vertical (en verde) con un ángulo desafinado, sin retro-reflexión de segundo orden. Adaptado de Chrostowski 2015 [1]

Los *grating couplers* que se analizan en esta sección son estructuras periódicas unidimensionales, que están bien descritas por la Ley de Bragg, vista en la sección 3.4.6.

La onda incidente sobre el *grating* es una onda guiada que se propaga en una guía de onda tipo losa (*slab*), con una dirección de propagación en el mismo plano que el *grating* y es normal a las estructuras salientes del *grating*. La constante de propagación de la guía de ondas es:

$$\beta = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_0}, \tag{5.1}$$

donde λ_0 es la longitud de onda óptica y n_{eff} es el índide efectivo de la guía de onda tipo *slab*.

La periodicidad de la red se describe mediante $K = 2\pi/\Lambda$, donde Λ es el período de la red. Se pueden considerar redes de difracción de orden superior utilizando $m \cdot K$. La forma general de la condición de Bragg se puede expresar como:

$$\beta - k_x = m \cdot K, \tag{5.2}$$

donde k_x es la componente del vector de onda de la onda difractada en la dirección de la onda incidente. La onda difractada viaja a través del revestimiento (*cladding*)

con un índice de refracción, n_c (suponiendo aire como *cladding*).

La luz difractada tiene un vector de onda:

$$k = \frac{2\pi n_c}{\lambda} \tag{5.3}$$

Dada la diferencia entre el vector de onda de la luz difractada, k, y la componente horizontal, k_x, esto conduce a un ángulo difractado de:

$$sin(\theta_c) = \frac{k_x}{k} = n_{eff}\frac{\lambda}{\Lambda} \tag{5.4}$$

como suponemos aire como *cladding* entonces, $k = k_0$. Por lo tanto, la condición de Bragg se puede simplificar para que sea:

$$n_{eff} - n_c \cdot sin(\theta c) = \frac{\lambda}{\Lambda} \tag{5.5}$$

y para el ángulo en el aire, θ_{air}, usando la Ley de Snell, esto se convierte en:

$$n_{eff} - sin(\theta_{air}) = \frac{\lambda}{\Lambda} \tag{5.6}$$

Finalmente, el periodo del *grating* se calcula como:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{n_{eff} - sin(\theta_{air})} \tag{5.7}$$

5.3.2. Diseño y simulaciones

La metodología de diseño puede seguirse a través de la referencia [8]. El primer paso es identificar las limitaciones del proceso de fabricación, esto implica los límites de resolución litográfica y el nodo tecnológico (SOI, Si_3N_4) en donde se van a trabajar, esto permite definir los objetivos de diseño. Luego, se realiza un diseño basado en cálculos analíticos de la condición de Bragg presentada en la sección anterior. Las simulaciones del desempeño del diseño y su optimización se realiza luego mediante simulaciones FDTD 2D y 3D.

Por último, para facilitar una comprensión rápida del lector sobre este tipo de dispositivos, se puede observar el rendimiento de los *grating couplers* al variar sus parámetros más relevantes utilizando un simulador online desarrollado por AIM Photonics, disponible en https://s3.amazonaws.com/fip-8/Period-and-Angle/index.html (Figura 5.6).

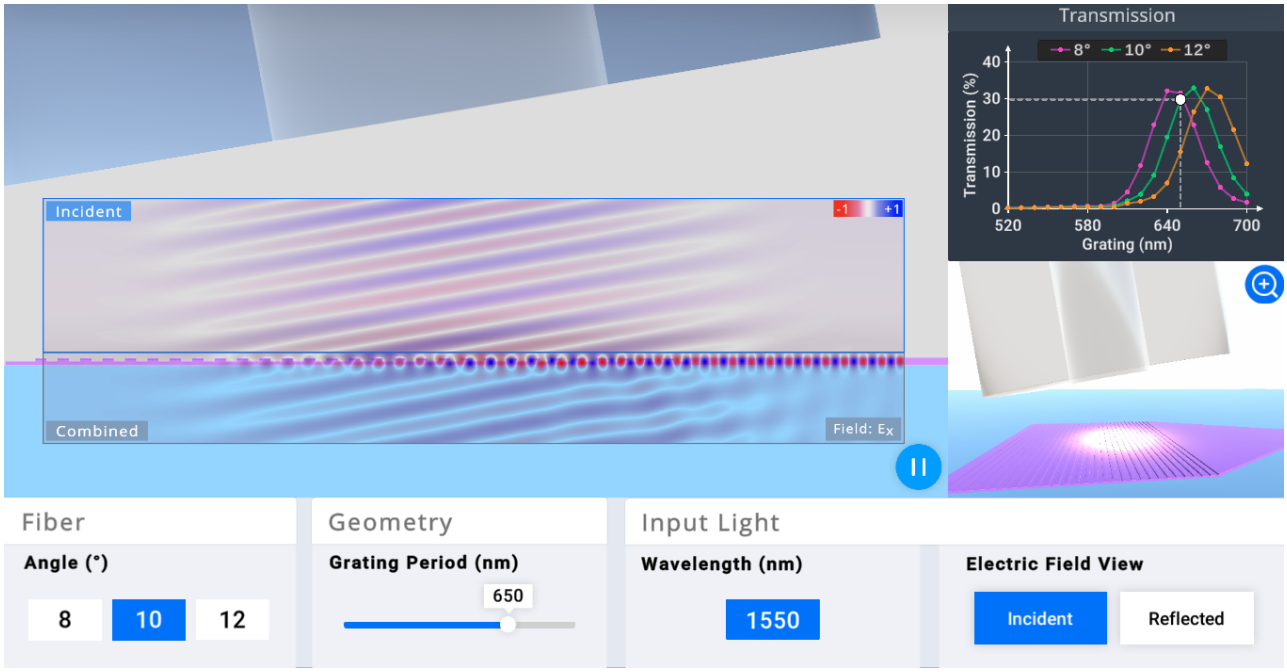


Figura 5.6: Simulación de un *grating coupler* variando el ángulo de la fibra incidente y el periódo de la red. Fuente: AIM Photonics.

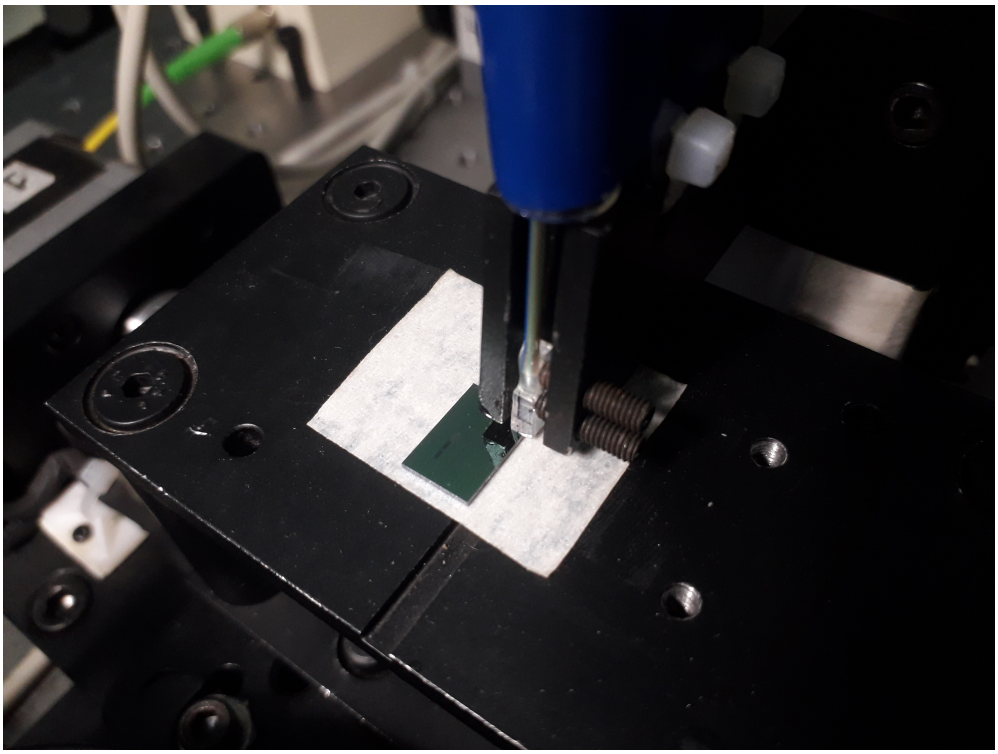


Figura 5.7: Foto de un sistema de acople *FiberArray-to-chip* mediante *grating couplers* desarrollado en esta tesis.

5.4. *Edge Couplers.*

Los acopladores de borde (*edge couplers*) se utilizan para acoplar la luz desde el costado del chip. El acoplamiento de bordes es el enfoque más común para empaquetar componentes fotónicos, como láseres, amplificadores ópticos semiconductores y detectores, por lo que existe una importante experiencia industrial. Las ventajas incluyen un amplio ancho de banda óptico, baja pérdida de inserción (inferior a 0,5 dB) [9] y la capacidad de acoplar polarizaciones TE y TM.
Los desafíos incluyen la dificultad de alineación debido a la sensibilidad de alineación. La fabricación es más compleja, es decir elementos como: (1) *tapers*, convertidores de modo, lentes o fibras con lentes (*lensed fiber*), son necesarios para hacer coincidir el haz de las guías de ondas en SOI o Si_3N_4 altamente confinadas con la fibra óptica, y (2) Se requiere clivar, pulir, o hacer *etching* en los bordes del chip, y pueden ser deseables revestimientos antirreflectantes.

5.4.1. Fibras individuales.

En este enfoque, las fibras individuales se colocan sobre el chip para los *grating couplers* y en el lateral para los acopladores de borde. Las posiciones de las fibras se controlan de forma independiente mediante micropasos o micro-posicionadores de actuador piezoeléctrico, lo que permite libertad en el enfoque de diseño; esto, por ejemplo, permite probar un dispositivo 1-N, como dispositivos demultiplexores, como un AWG con una sola entrada y numerosas salidas (por ejemplo, 16). En este caso, solo es necesario posicionar la fibra de salida para probar canales separados. Los extremos de las fibras pueden ser cortadas o con lentes (*lensed fiber*); pueden ser monomodo, fibras que mantienen la polarización o incluso fibras polarizadoras. Las desventajas de este enfoque son que no se escala a numerosas fibras ópticas (incluso cuatro fibras son difíciles de construir); La eficiencia en la compacidad del diseño puede no ser tan alta como la del uso de un conjunto de fibras (*fiber array*), y existen desafíos con la inestabilidad y las vibraciones en las fibras.

5.4.2. Convertidores del tamaño del spot.

Para el acoplamiento de borde, el diámetro del campo modal y la apertura numérica de la interfaz del chip fotónico normalmente no coinciden con las fibras monomodo convencionales. Esto requiere un mecanismo para reducir el tamaño del modo desde la fibra óptica hasta el chip y viceversa. Esto se hace comúnmente mediante el uso de lentes de espacio libre en el encapsulado para láseres InP,

moduladores, etc. La lente también puede estar en la punta de la fibra, y por eso se denomina *lensed fiber*. También se pueden utilizar fibras de alta apertura numérica, que están cortadas, pero esto traslada el problema a la interfaz entre la fibra de alta NA y la fibra monomodo. Los convertidores de tamaño de punto convierten adiabáticamente el modo desde el modo grande en la fibra monomodo, hasta el modo pequeño del acoplador de borde del chip de silicio. La conversión de tamaño de punto se puede implementar en una fibra óptica cónica, ya sea como una fibra individual o como numerosas fibras ópticas que interactúan como una matriz 1D de acopladores de borde. La conversión del tamaño de punto también se puede implementar utilizando un chip de circuito de onda de luz planar (PLC) [10].

5.4.3. Acoplador de borde tipo *Nano-taper*

Existen varios métodos para implementar un *edge coupler* en la fotónica de silicio. El requisito principal es convertir el modo altamente confinado en la guía de onda a un modo de fibra óptica mucho más grande (o viceversa), utilizando un convertidor de tamaño del spot. Esto requiere abordar tanto el desajuste del tamaño del modo como el desajuste del índice efectivo de los modos de la fibra y la guía de onda. El enfoque típico, conocido como *inverse taper* o *nanotaper*, es aquel en el que la guía de onda se estrecha hasta un tamaño muy pequeño de modo que la luz apenas es guiada por la guía de onda y el campo evanescente de la guía de onda se vuelve grande [11]. Este enfoque también se puede implementar mediante estructuras de sub-longitud de onda [12] o una estructura del tipo *knife-edge* [13]. Ambos enfoques conducen a un diámetro de campo de modo que se expande en la conicidad del *taper*, semejante a los *lineal tapers* introducidos en la sección 3.4.1.

A continuación, vamos a diseñar y modelar la geometría de un acoplador por borde *nano-taper*.

Enfoque para el cálculo de solapamiento de modos

El primer método para determinar la eficiencia de acoplamiento es estimarla utilizando cálculos de modo (MODE) en la punta del *nano-taper*. Esto se justifica bajo la suposición de que el *taper* es adiabático, y que el modo en la punta del *taper* representará el perfil del modo después de propagarse por el *taper*. Específicamente, encontramos el perfil del modo para una guía de onda de 180 nm de ancho, 220 nm de espesor, rodeada por óxido. El perfil simulado del modo del *nano-taper* se muestra en la Figura 5.8.

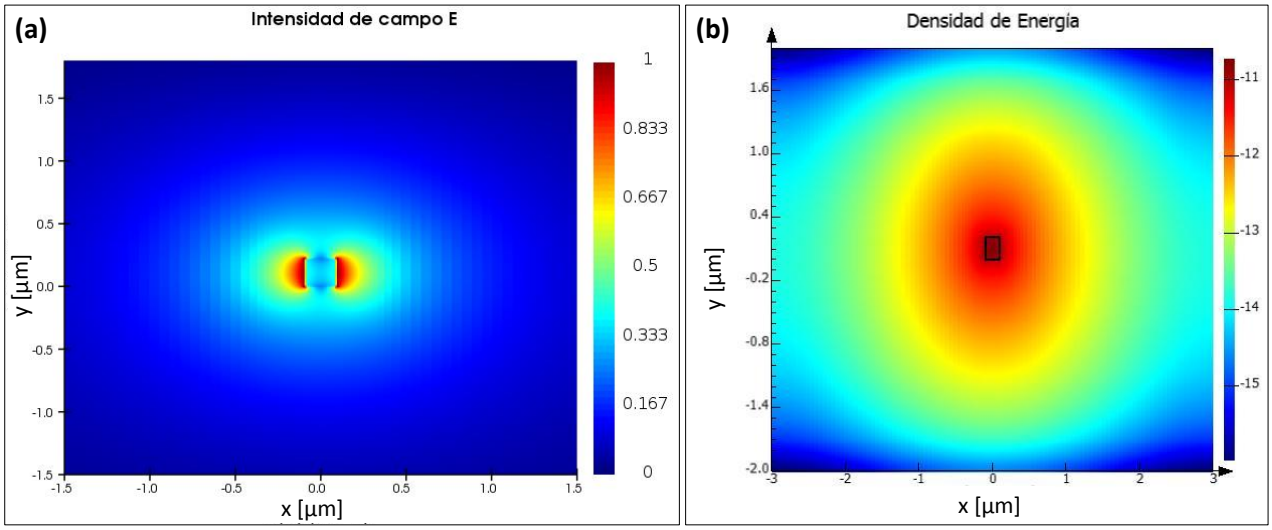


Figura 5.8: Perfil de modo de un *nano-taper* de 180 × 220 nm, $\lambda = 1.55$ μm, polarización cuasi-TE. El índice efectivo es 1.46 (muy cercano al índice del material SiO_2).

Deseamos considerar el acoplamiento desde el acoplador de borde *nano-taper* (área modal = 1.47 $\mu^2 m$), hacia un haz gaussiano (por ejemplo, una fibra con lente, un ensamblaje de lentes con una fibra adjunta, o una lente de alta apertura numérica). Por lo tanto, en la simulación, los haces gaussianos se crean mediante lentes ideales con varias aperturas numéricas, NA. Los perfiles para haces gaussianos con $NA = 0{,}8$; 0,56; 0,34 y 0,1 se muestran en la Figura 5.9 de izquierda a derecha respectivamente. A partir de estas imágenes, queda claro que los perfiles de los modos no coinciden, por lo que se anticipa que habrá pérdida por desajuste de modo.

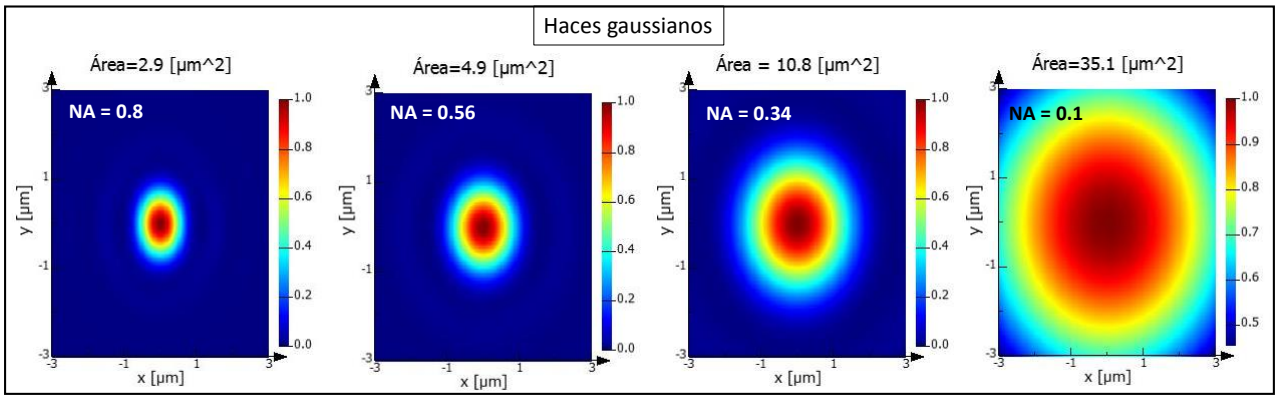


Figura 5.9: Perfil del modo de los haces Gaussianos, creados utilizando una lente con aperturas numéricas NA optimizadas desde 0.8 hasta 0.1 para el acoplamiento del modo TE.

Luego realizamos cálculos de solapamiento con los haces gaussianos variando las aperturas numéricas. Los cálculos de solapamiento nos permiten determinar

la mejor eficiencia de acoplamiento entre el *nano-taper* y el haz gaussiano, y encontrar la mejor apertura numérica para este haz. Como se muestra en la Figura 5.10(a), el mejor acoplamiento se obtiene para aperturas numéricas relativamente

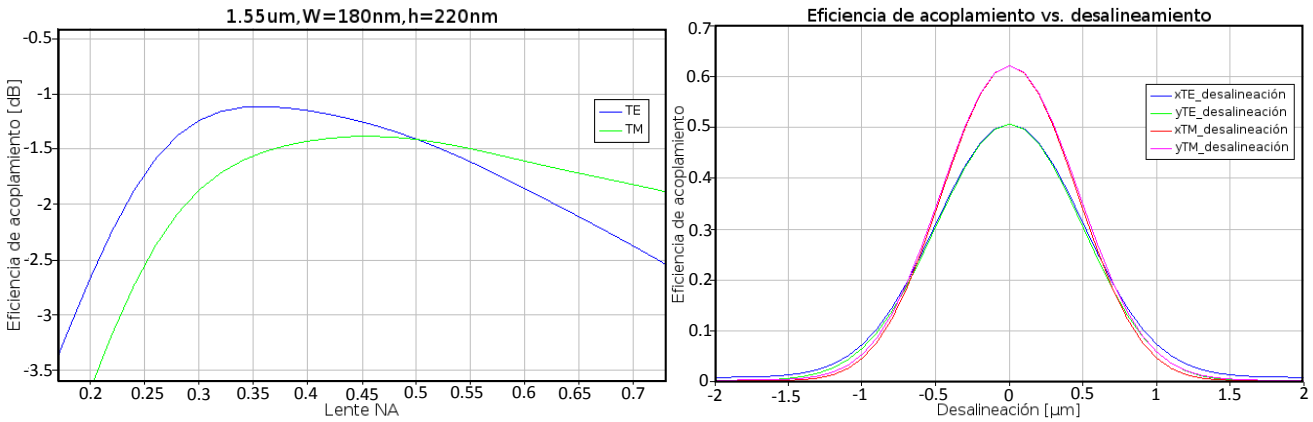


Figura 5.10: (a) Cálculos de superposición de modos que muestran la eficiencia del acoplamiento de potencia en función de la apertura numérica de la lente. Conicidad nanométrica de 180 × 220 nm, $\lambda = 1.55$ μm, polarización cuasi-TE. (b) Cálculos de superposición de modos que muestran la eficiencia del acoplamiento de potencia frente a la desalineación (x, y): Conicidad nanométrica de 180 × 220 nm, $\lambda = 1.55$ μm, polarización cuasi-TE.

grandes (0,4 para TE, y 0,55 para TM), especialmente en comparación con fibras monomodo convencionales ($NA = 0{,}14$). Las fibras con estos valores están disponibles y se denominan fibras de alta NA.

Utilizando cálculos de solapamiento de modos, se puede simular la sensibilidad del alineamiento. Esto se realiza desplazando un modo relativo al otro y efectuando cálculos de solapamiento. Los resultados para el desalineamiento en las dos dimensiones (x, y) se muestran en la Figura 5.10(b). Los resultados indican que el acoplamiento decae aproximadamente a la mitad para un desalineamiento de 0,5 μm.

El método de cálculo de la superposición de modos es una aproximación rápida, pero tiene limitaciones al no tener en cuenta las siguientes consideraciones: Las reflexiones en las interfaces óxido-guía de onda y óxido-aire; la propagación del campo en la región corta de óxido entre la punta y la superficie del óxido grabado; la propagación del campo en el espacio entre la superficie del borde y la fibra; el propio *taper*, que debe ser lo suficientemente largo para garantizar que sea adiabático y sin pérdidas considerables.

Enfoque FDTD.

El segundo método para determinar la eficiencia de acoplamiento es realizar cálculos 3D con FDTD (ver Figura 5.11). Específicamente, modelamos en FDTD el *taper* adiabático, la punta del *taper*, el óxido y el aire. Luego realizamos cálculos de superposición con haces gaussianos creados por lentes ideales con varias aperturas numéricas. Al igual que en el método anterior, esto nos permite determinar la mejor eficiencia de acoplamiento y la mejor apertura numérica. Esta simulación podría extenderse para incluir la fibra óptica en sí.

Propagación del campo: La Figura 5.11 muestra los resultados simulados de la propagación del campo a lo largo del *taper*, con vistas desde la parte superior y desde la sección transversal. En la simulación, la interfaz óxido-aire está en $y = 0$. La simulación muestra algunas oscilaciones espaciales, que se deben a la reflexión en la interfaz óxido-aire. Se observa que el campo se expande a medida que se propaga de izquierda a derecha.

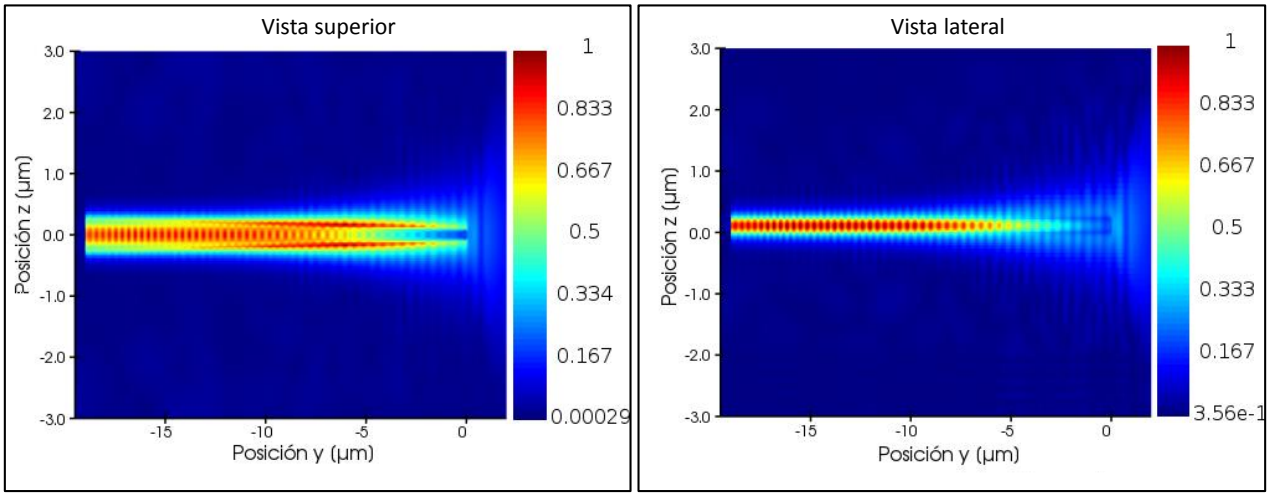


Figura 5.11: Simulación FDTD de los perfiles de campo del acoplador de borde tipo *nano-taper*. Longitud del *nano-taper* 20μm, con punta de 180 $\times$ 220 nm, $\lambda = 1.55$ μm, polarización cuasi-TE.

El perfil del campo a la salida del *taper* (en el aire) se muestra en la Figura 5.12 Este es el perfil de campo cercano, tal como sería observado por una fibra en contacto directo con el chip (o muy cerca de él).

Perfil de campo lejano: Para el acoplamiento con lentes, el perfil de campo lejano también es importante, y se muestra en la Figura 5.13(izquierda). A partir del patrón de campo lejano, se pueden determinar los ángulos de divergencia del *taper*. Los perfiles de campo lejano se muestran en una dimensión en la Figura 5.13 (derecha). Estos muestran un ancho total a mitad del máximo (*FWHM*, por

sus siglas en inglés) de aproximadamente 40° de la distribución de intensidad máxima.

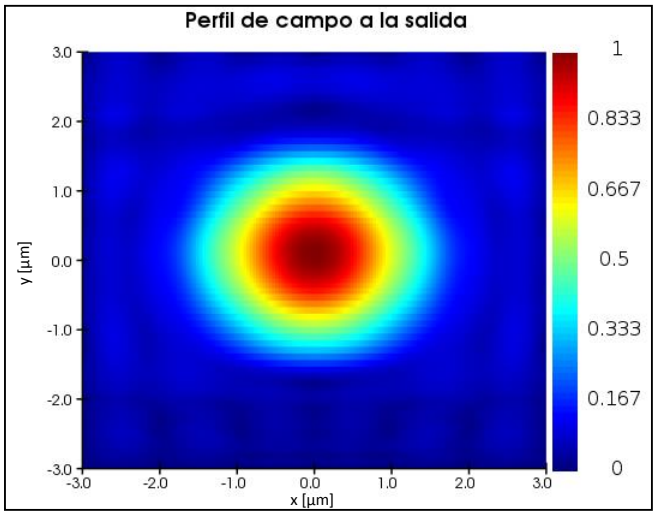


Figura 5.12: Simulación FDTD del perfil de campo del acoplador de borde *nano-taper* en la salida (en el aire): eje x tangencial a la guía de onda; eje y normal a la superficie oblea. Longitud del *nano-taper* 200 μm, con punta de 180 × 220 nm, $\lambda = 1.55$ μm, polarización cuasi-TE.

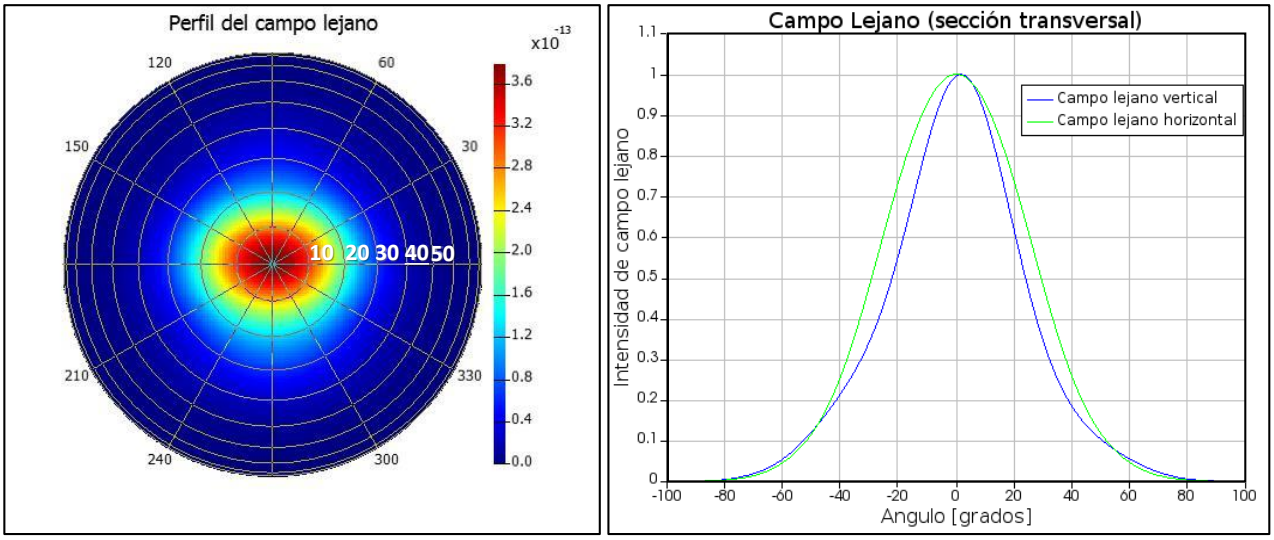


Figura 5.13: Simulación FDTD del acoplador de borde *nano-taper*: proyección de campo lejano en la salida. Longitud del *nano-taper* 20 μm, con punta de 180 × 220 nm, $\lambda = 1.55$ μm, polarización cuasi-TE.

Finalmente, se realizan cálculos de superposición entre el perfil de campo cercano calculado con FDTD y el haz gaussiano de una lente ideal. Los resultados se muestran en la Figura 5.14. Se realizaron cálculos para varias longitudes del

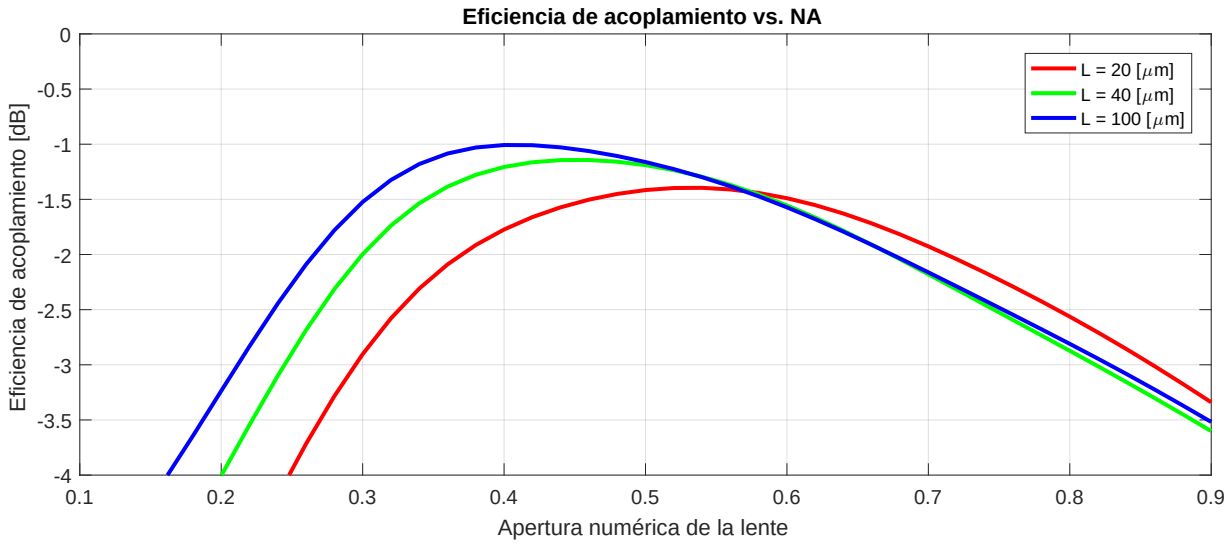


Figura 5.14: Simulación FDTD: cálculos de superposición de modos que muestran la eficiencia del acoplamiento de potencia en función de la apertura numérica de la lente. Se consideran varias longitudes del *taper*, L = (20, 40, 100) μm; punta del *nano-taper* de 180 $\times$ 220 nm, λ = 1.55 μm, polarización cuasi-TE.

nanotaper. Se observa que el *taper* necesita tener al menos 100 μm de longitud para evitar pérdidas debido al propio estrechamiento del *taper*. La pérdida de inserción simulada alcanza un valor óptimo de 1 dB.

Referencias

[1] Lukas Chrostowski y Michael Hochberg. *Silicon Photonics Design: From Devices to Systems*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2015.

[2] Sharee McNab, Nikolaj Moll y Yurii Vlasov. «Ultra-low loss photonic integrated circuit with membrane-type photonic crystal waveguides». En: *Optics Express* 11.22 (2003). cit. on pp. 162, 164, págs. 2927-2939.

[3] A. Mekis, S. Abdalla, D. Foltz et al. «A CMOS photonics platform for high-speed optical interconnects». En: *Photonics Conference (IPC)*. cit. on pp. 162, 164. IEEE, 2012, págs. 356-357.

[4] Wissem Sfar Zaoui, Andreas Kunze, Wolfgang Vogel et al. «Bridging the gap between optical fibers and silicon photonic integrated circuits». En: *Optics Express* 22.2 (2014). cit. on pp. 162, 164, págs. 1277-1286. DOI: 10.1364/OE.22.001277.

[5] Dirk Taillaert, Harold Chong, Peter I. Borel et al. «A compact two-dimensional grating coupler used as a polarization splitter». En: *IEEE Photonics Technology Letters* 15.9 (2003). cit. on p. 162, págs. 1249-1251.

[6] N. Na, H. Frish, I. W. Hsieh et al. «Efficient broadband silicon-on-insulator grating coupler with low back-reflection». En: *Optics Letters* 36.11 (2011). (cit. on p. 164), págs. 2101-2103.

[7] D. Vermeulen, Y. De Koninck, Y. Li et al. «Reflectionless grating coupling for silicon-on-insulator integrated circuits». En: *Group IV Photonics (GFP)*. (cit. on p. 164). IEEE, 2011, págs. 74-76.

[8] Yun Wang et al. «Universal grating coupler design». En: *Proc. SPIE*. Vol. 8915. cit. on pp. 168, 170. 2013, 89150Y. DOI: 10.1117/12.2042185.

[9] Minhao Pu et al. «Ultra-low-loss inverted taper coupler for silicon-on-insulator ridge waveguide». En: *Optics Communications* 283.19 (2010). cit. on p. 382, págs. 3678-3682.

[10] *PLC Connections PLCC – Silicon Photonics*. Accessed 2014/04/14. Cited on pp. 383, 384, 385. 2014. URL: http://www.plcconnections.com/silicon.html.

[11] V. R. Almeida, R. R. Panepucci y M. Lipson. «Nanotaper for compact mode conversion». En: *Optics Letters* 28.15 (2003). (cit. on p. 183), págs. 1302-1304.

[12] Jens H. Schmid, Przemek J. Bock, Pavel Cheben et al. «Applications of subwavelength grating structures in silicon-on-insulator waveguides». En: *OPTO*. (cit. on p. 183). International Society for Optics y Photonics, 2010, 76060F-76060F.

[13] R. Takei, M. Suzuki, E. Omoda et al. «Silicon knife-edge taper waveguide for ultralow-loss spot-size converter fabricated by photolithography». En: *Applied Physics Letters* 102.10 (2013). (cit. on p. 183), pág. 101108.

Parte III

Resultados.

Capítulo 6

Fabricación de dispositivos ópticos integrados en Nitruro de Silicio

Índice

6.1. Consideraciones de micro-fabricación 158
6.2. Fabricación de fotomáscara de vidrio y cromo 159
6.2.1. Diseño de la fotomáscara - Layout 159
6.3. Caracterización de procesos litográficos 162
6.3.1. Depositos de fotoresina AZ1518 Y AZ701 MIR 162
6.3.2. Exposición con lámpara UV 164
6.3.3. Caracterización del revelado 167
6.3.4. Caracterización de los ataques físicos/químicos (*etching*). 169
6.3.5. Medida de espesores con elipsometría 171
6.3.6. Remoción de fotoresinas. 173
6.3.7. Corte de obleas. 174
6.3.8. Chips fabricados. 176
6.3.9. Resumen procesos de micro-fabricación. 177
6.3.10. Efecto borde. 178
6.3.11. Pulido de bordes. 180
6.3.12. Sistema experimental de acople óptico por borde en chips fotónicos. . 181
6.3.13. Montaje del sistema mediante acople *edge couplers*. 181

En este capítulo vamos a profundizar las técnicas de micro-fabricación CMOS descritas en la sección anterior. Se introducirá la infraestructura y tecnología empleada en esta tesis para fabricar chips fotónicos integrados con la plataforma

del Nitruro de Silicio (Si_3N_4). Este desarrollo se llevo a cabo en la sala limpia del Departamento de Micro y Nano Tecnología del Centro Atómico Constituyentes (CNEA), en donde se lleva a cabo los procesos y recetas bien establecidas por la industria de los semiconductores, al régimen de la fotónica integrada con el mismo equipamiento tecnológico.



Figura 6.1: Máquinas de la sala limpia del Departamento de Micro y Nanotecnología (DMNT).

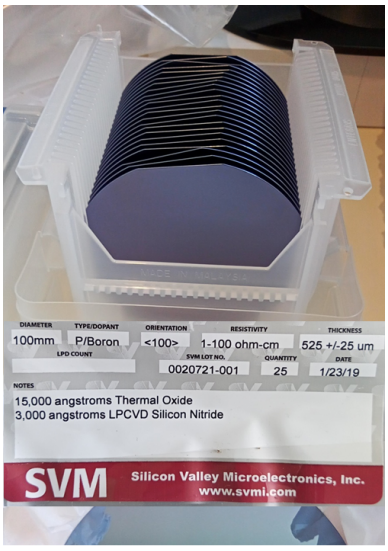


Figura 6.2: Lote adquirido de wafers de Si_3N_4 depositados por LPCVD.

Se adquirió un lote de obleas (*wafers)* de Nitruro de Silicio de la firma Silicon Valley Microelectronics, con una estructura de capas $Si_3N_4/SiO_2/Si$. Este lote de obleas tienen Si_3N_4 depositado mediante LPCVD, con un eje cristalino (1,0,0), lo que significa que pueden ser cortadas en dos ejes preferenciales (x,y). Existen claras ventajas que se obtienen al depositar nitruro de silicio por LPCVD, y es que tiende a proporcionar películas con menor contenido de impurezas en comparación con el nitruro con PECVD, como se vio en las sección 4.2.3. Esto es especialmente crítico en aplicaciones donde se requiere alta pureza, como en el desarrollo de dispositivos fotónicos integrados. El primer paso es fabricar una fo-

tomáscara que va a contener los patrones de todos los dispositivos de interés. Luego, se caracterizan los procesos litográficos: depósito de fotoresinas sobre obleas, exposición UV entre oblea-fotomáscara y el revelado. Finalmente, se procede a realizar ataques físicos/químicos para definir las paredes de las guías de onda. A continuación se describen los procesos llevados a cabo.

6.1. Consideraciones de micro-fabricación

Para fabricar dispositivos integrados con la tecnología del silicio, se debe tener en cuenta 2 consideraciones: La física del dispositivo y los límites de resolución del proceso litográfico. Teniendo en cuenta esto, se puede definir la geometría de los patrones que va a contener la máscara litográfica.

Física del dispositivo: Los dispositivos fotónicos deben estar diseñados teniendo en cuenta las propiedades ópticas y materiales, como la dispersión y las pérdidas. La elección de materiales como el silicio, el nitruro de silicio o materiales III-V es crucial debido a sus propiedades ópticas y eléctricas, cada nodo tecnológico determinará distintas resoluciones mínimas y máximas para fabricar guías de onda. Se deben considerar parámetros como la longitud de onda de operación, la eficiencia de acoplamiento, y la tolerancia a variaciones de temperatura.

Límites de resolución del proceso litográfico: La resolución de los patrones en la máscara depende de la tecnología utilizada, por ejemplo, fotolitografía UV, litografía por haz de electrones. Las dimensiones mínimas pueden ser definidas en el proceso litográfico, como el tamaño de las guías de onda, espacios y otros elementos críticos.

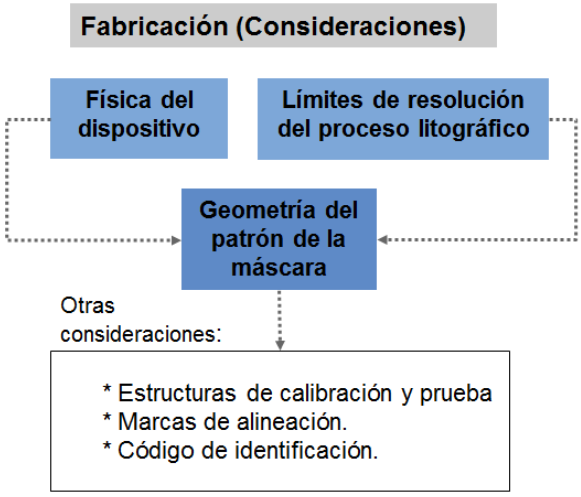


Figura 6.3: Consideraciones relevantes al momento de fabricar dispositivos fotónicos integrados.

6.2. Fabricación de fotomáscara de vidrio y cromo

El primer paso es fabricar una máscara litográfica que va a contener los patrones de los dispositivos. Posteriormente son transferidos a obleas o muestras de $Si3N4$,

6.2.1. Diseño de la fotomáscara - Layout

Herramientas de diseño

Para realizar el layout de la fotomáscara, se utilizaron herramientas de diseño asistido 2D como LibreCAD [1] y Klayout [2]. Además se utilizó la librería gdspy, es una biblioteca en Python para crear, modificar y manipular archivos GDSII (también conocidos como GDS2), que son el formato estándar utilizado en la industria de los semiconductores para la representación de datos de diseño de circuitos integrados, y particularmente en el ámbito de la fotónica integrada. La librería gdspy permite hacer planos de chips de manera más rápida y eficiente, principalmente porque permite automatizar muchas tareas repetitivas en el diseño de chips, como la creación de múltiples estructuras geométricas similares o la repetición de patrones. Esto reduce significativamente el tiempo necesario para generar diseños complejos. Además, al utilizar *scripts* en Python para crear diseños, se garantiza una mayor precisión y consistencia en el *layout*, los errores humanos se minimizan, especialmente en tareas de diseño detallado y repetitivo. Esto hace que gdspy sea una herramienta valiosa para ingenieros y diseñadores de circuitos integrados, permitiéndoles enfocarse más en la innovación y menos en las tareas tediosas del diseño manual [3] [4].

Entonces, cuando los diseños de los dispositivos fotónicos están definidos, se procede a diseñar la máscara (*mask layout*, ver figura 6.4), que se utilizará en el proceso de fabricación para transferir el circuito óptico al dispositivo. El *layout* final va a depender de la geometría de los dispositivos y de plataforma tecnológica utilizada.

En la fabricación de la máscara litográfica, se utiliza un masterizador comercial (ver Figura 6.5) que permite grabar sobre una placa de Vidrio + Cr_2O_3 el circuito óptico diseñado (ver Figura 6.6) utilizando para ello técnicas convencionales de foto-litografía UV que se presentaron en el capitulo 4.3 y se detallaran mas adelante.

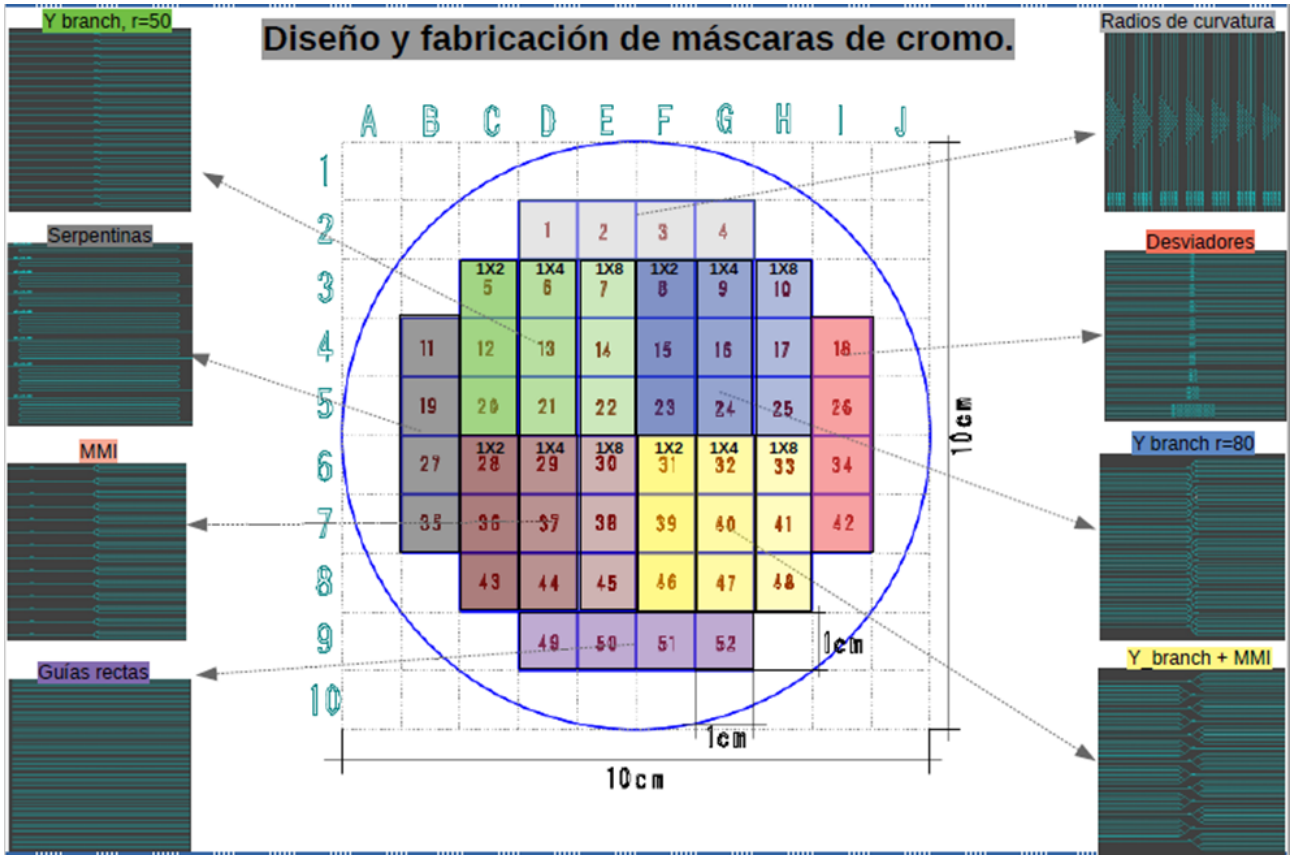


Figura 6.4: *Layout* del diseño de la máscara, contiene alrededor de 1000 dispositivos fotónicos, entre ellos divisores de potencia ópticos (*splitters*) SCC+MMI y convencionales con ramas 1x2, 1x4 y 1x8



Figura 6.5: Masterizador Heidelberg DWL66fs

Sobre la máscara se deposita fotoresina (PR) positiva AZ1518, y se la expuso con luz ultravioleta utilizando el equipo comercial que tiene un diodo láser que funciona a 405 nm para escritura directa. Se utiliza una lente de cabezal de 2 mm de longitud focal para enfocar el rayo láser sobre la máscara, de esta manera se puede obtener alta resolución (sub-micrométrica). El *stage* del sistema está equipado con un motor lineal para los ejes X,Y y el movimiento es controlado mediante interferometría, el *stage* también está equipado con sistema de vacío donde se ubica la máscara para atraparla. El obturador y el desplazamiento de la máscara son controlados por la computadora del sistema. El usuario puede configurar la energía del láser durante la exposición (se establece en términos de porcentaje de la energía máxima) y la desviación del enfoque (DeFOC) de la posición predeterminada de la lente.

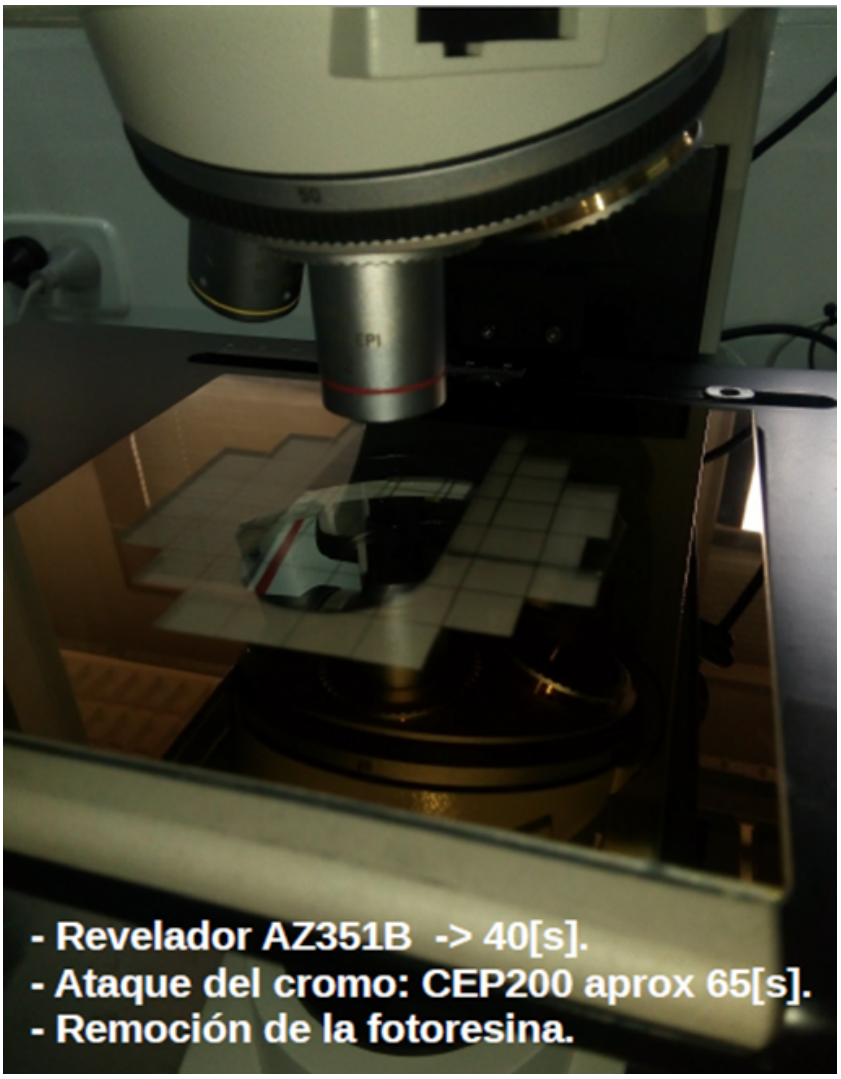


Figura 6.6: Máscara fabricada de vidrio + Cr_2O_3 grabada con masterizador comercial UV. Luego se aplicaron procesos litográficos para definir las estructuras de los patrones.

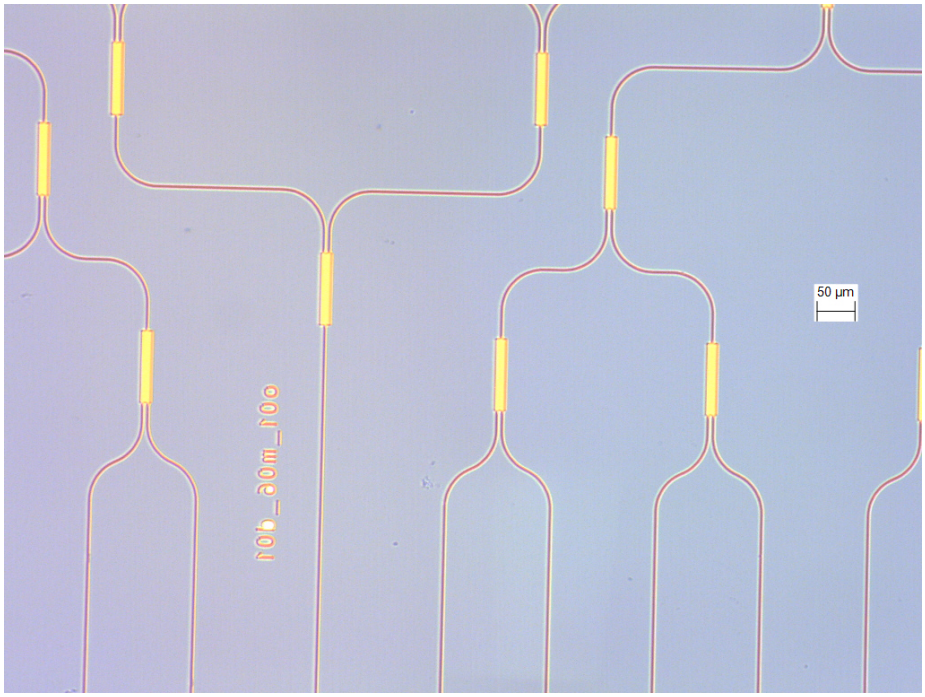


Figura 6.7: Imagen tomada con microscopio, de los patrones de cromo grabados en la máscara.

6.3. Caracterización de procesos litográficos

Para llevar a cabo los procesos litográficos, se transfiere el circuito óptico a través de la fotomáscara a una oblea o muestras, compuestas por una capa de Nitruro de Silicio (300 nm de espesor), que yace sobre una película dióxido de silicio (1500 nm de espesor) depositada sobre una sustrato de silicio (500 μm). En este sentido se deposita una fotoresina (PR) sobre la oblea: $(\mathrm{PR}/Si_3N_4/SiO_2/Si)$. A esta estructura de capas recubierta por PR, se la alinea con la máscara y se la expone mediante una lámpara UV. Luego se revela la oblea, y se consigue remover la fotoresina, menos en las zonas donde fue expuesta con UV. A continuación, se detalla la caracterización de cada proceso.

6.3.1. Depositos de fotoresina AZ1518 Y AZ701 MIR

El deposito de fotoresinas (PR) se realiza mediante *spin-coating*. Debido a su alto potencial de homogeneidad y rendimiento, el *spin-coating* es por lejos el método más utilizado para recubrir sustratos con fotoresinas.

En esta técnica, normalmente se introduce unos pocos ml de PR sobre el sustrato (ver figura 6.8), generalmente se lleva a una velocidad de rotación entre 1000 y 6000 rpm. Debido a la fuerza centrífuga generada, la fotoresina depositada

se esparce formando una película uniforme del espesor deseado, y el exceso se acumula en el borde del sustrato (efecto borde). Al mismo tiempo, una parte del disolvente se evapora de la película protectora formada, de modo que por un lado se detiene su adelgazamiento y, por otro lado, la película protectora se vuelve suficientemente estable.

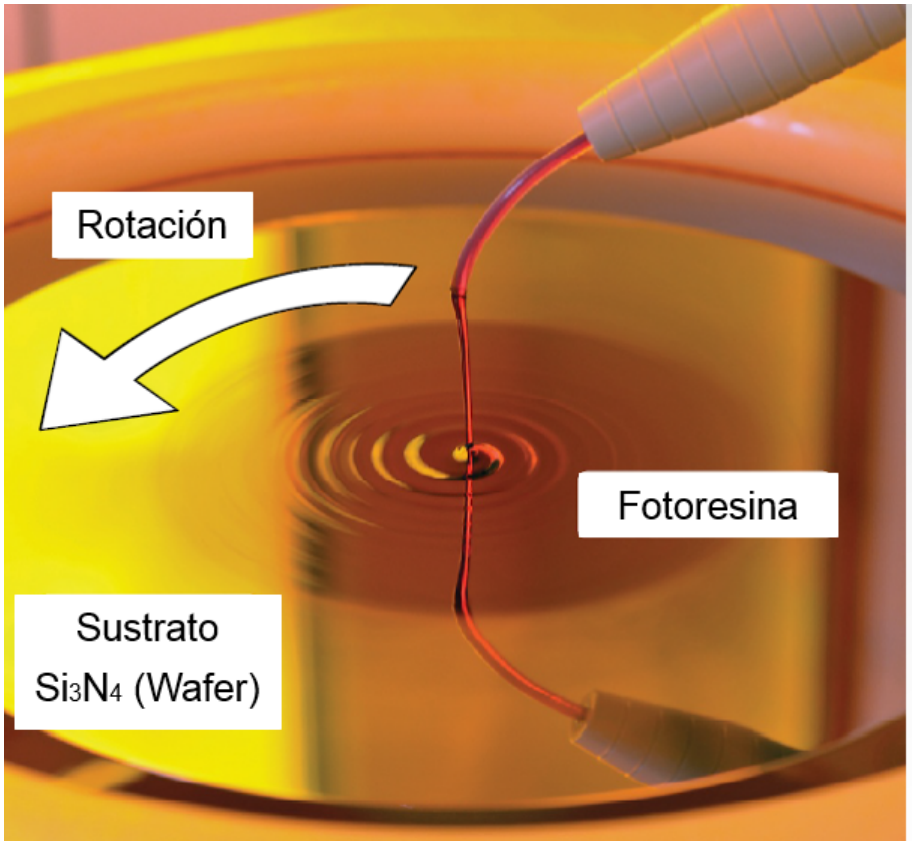


Figura 6.8: Depósito de fotoresina por *spin coating*.

En este trabajo utilizamos la fotoresina AZ MIR 701 14cps. En base a las curvas de la figura 6.9 que nos brinda el fabricante, se ajustó la receta del *spin coating* a 4000 rpm, en donde se puede observar que el espesor depositado es de $1\mu m$. El motivo por el cual buscamos ese espesor, es porque en los procesos litográficos, la resolución de los patrones (alrededor de $1\mu m$ en guías de onda monomodo con nitruro de silicio) están intrínsecamente relacionados con el espesor de la fotoresina. El espesor de la PR depositada debe ser igual o menor que la resolución litográfica que se desea alcanzar.

Luego del deposito de PR, la muestra atraviesa una etapa de un pre-cocido, entonces la colocamos sobre un *hot plate* a 110°C durante 1 minuto, dejándola lista para su posterior exposición UV.

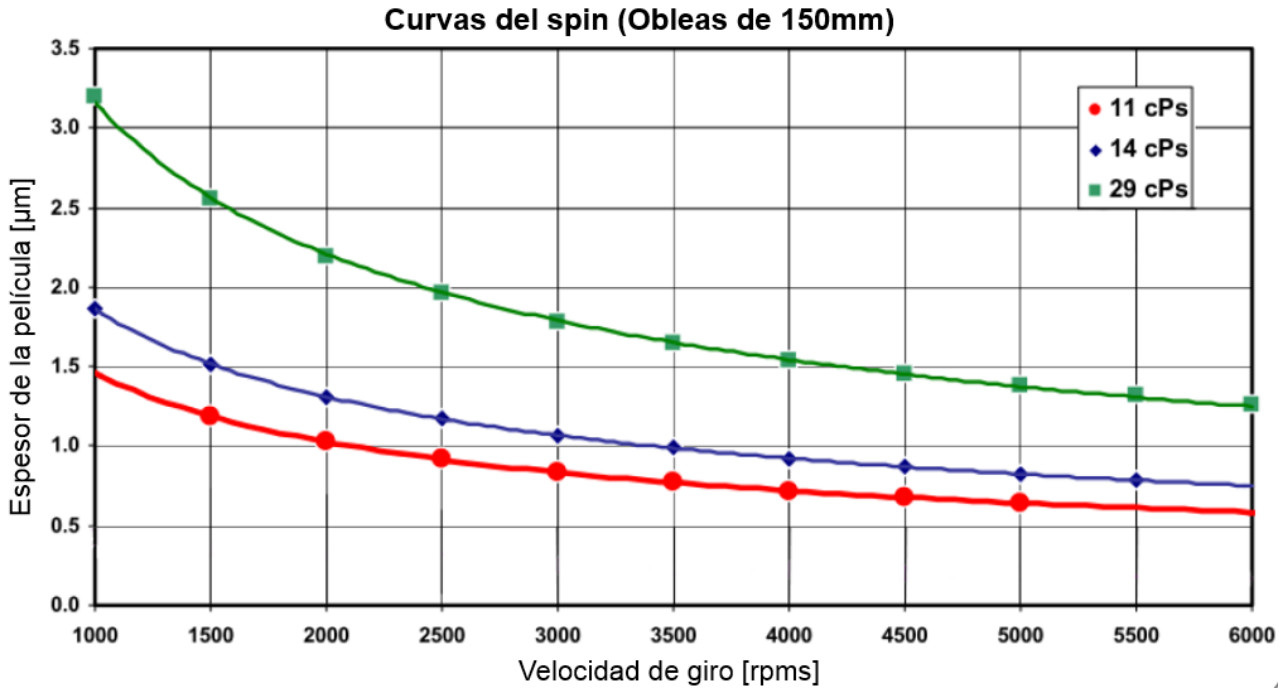


Figura 6.9: Fotoresina positiva AZ MIR-701 Series. Curvas del espesor en función de la velocidad de giro del *spin coating*.

Adherente TI PRIME: Previo de depositar la fotoresina sobre las muestras de nitruro de silicio, se depositó una película delgada de unos pocos nanómetros denominada "TI Prime". Es un líquido que aporta la adhesión en sustratos como el Si o el vidrio. Se lo aplica mediante *spin-coating*, donde una sub-capa se adhiere en la superficie del sustrato o *wafer*. En una siguiente sub-capa la superficie se activa. Después de enfriarse, se le aplica fusión mediante un *hot plate* a 120 $°C$. El Ti Prime mejoró la calidad de los patrones durante los procesos litográficos, sobre todo en la etapa de revelado, evitando un desprendimiento no deseado de fotoresina de los patrones transferidos.

6.3.2. Exposición con lámpara UV

En las secciones anteriores se han descrito los pasos necesarios para proporcionar un sustrato con un revestimiento resistente (PR) a la exposición UV. El siguiente paso es la exposición de fotoresinas y representa el principal proceso en la microestructuración.

Los procesos químicos que se producen aquí (en la película protectora), dan como resultado una solubilidad aumentada (fotoresinas positivas) o reducida (fotoresinas negativas) en el revelador, lo que permite producir una máscara protectora estructurada con los patrones transferido desde la máscara.

Técnica de exposición elegida: Existen varias técnicas para la exposición, en este trabajo la técnica empleada es la de *mask aligner* (alineador de máscaras). Al exponer con un alineador de máscara, la luz UV atraviesa paralelamente, a través de las áreas transparentes de la máscara litográfica previamente fabricada, hacia la película protectora (PR) (ver Figura 4.10). La fotomáscara se compone normalmente de una placa de vidrio o cuarzo como soporte, sobre la cual yace una fina capa de cromo con un patrón litográfico que forma un patrón opaco.

En condiciones ideales, las dimensiones de las estructuras de la máscara litográfica corresponden 1:1 a las dimensiones de las áreas expuestas de la película protectora, por lo que la imagen es congruente. Para optimizar la resolución alcanzada y minimizar la difracción, la fotomáscara y la superficie de la película protectora se las pone casi en contacto directo.

Distancia de la máscara como el límite inferior de resolución.

Las dimensiones de las áreas transparentes en la máscara litográficas son a menudo del orden de magnitud de unas pocas decenas de las longitudes de onda de la fuente de exposición. Por lo tanto, la imagen que pasa por una abertura en la superficie de la fotoresina no es una imagen paralela perfecta, sino que debe calcularse como un patrón de difracción detrás de una rendija.

Si tomamos un caso que trata una difracción en una rendija simple, la resolución lateral alcanzable d de la imagen incidente en la superficie de la fotoresina se representa mediante la fórmula $d = (\lambda g)^{1/2}$ [5] con la longitud de onda de exposición λ y la distancia g (distancia desde la parte inferior de la fotomáscara hasta la superficie de la fotoresina).

Dicho espacio definido puede estar destinado a prevenir daños a la máscara litográfica en el caso de sustratos texturizados o, en sustratos lisos para evitar que la fotomáscara se adhiera a la película de fotoresina. Las razones de un espacio no intencional, sin embargo, pueden ser:

- Partículas en la película de la fotoresina provenientes del aire limpio de la sala limpia, sustratos contaminados o fotoresinas caducadas.
- Burbujas de aire en la película de la fotoresina debido a la dispensación manual de la resina.
- Un borde elevado de la fotoresina por deposito mediante *spin coating*.

En la Figura 6.10(a), se muestra la distribución de la intensidad de la luz en el espacio de aire entre la máscara litográfica y la superficie de la fotoresina corresponde al patrón de difracción de una rendija simple. Esto ocurre cuando una

película de fotoresina se expone a través de aberturas de diferentes tamaños en una máscara litográfica. La distribución de la intensidad de la luz en la superficie de la fotoresina (representada como una línea verde) varía según el tamaño de la rendija: Para una rendija estrecha (extremo izquierdo), la distribución de la luz se asemeja a una fuente puntual o lineal; Para una rendija ancha (extremo derecho), la distribución de la luz forma una figura cada vez más paralela a través de la apertura de la máscara litográfica.

En la Figura 6.10(b) con el mismo esquema de colores que en (a), la distancia entre la máscara litográfica y la superficie de la fotoresina varía desde cero (exposición de contacto, izquierda), hasta un valor de varias longitudes de onda cuando se aleja la máscara de la película de fotoresina (derecha), manteniendo un ancho constante de la rendija de la máscara litográfica. De izquierda a derecha, se observa un patrón de difracción cada vez más marcado que corresponde a una distribución de intensidad no homogénea.

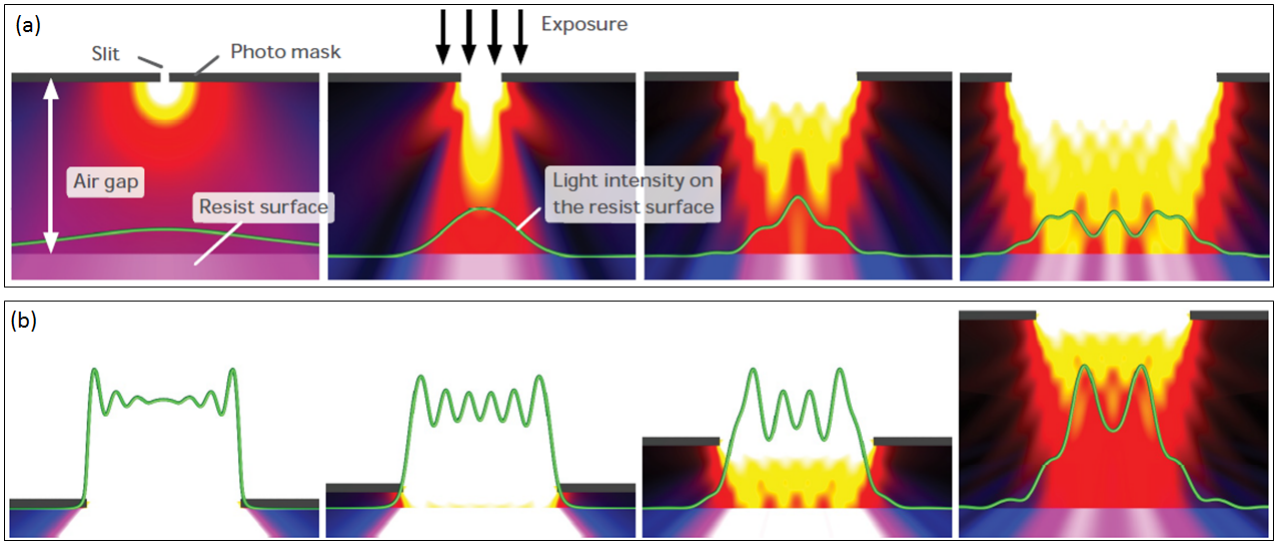


Figura 6.10: (a) Distribución de intensidad a través de aberturas de distintos tamaños en la fotomáscara. (b) Distribución de intensidad a medida que la fotomáscara se aleja de la película de fotoresina.

Se utilizó un alineador de máscaras comercial EVG620 (Figura 6.11). El primer paso de esta etapa es encender el sistema y calentar la lámpara UV, luego, se ingresa la máscara al alineador y queda sujeta con un sistema de vacío. Seguido, se ingresa la oblea o la muestra, y con las ópticas del sistema se la alinea manualmente con los patrones de la máscara que se desean transferir. Una vez alineado, el sistema pone en contacto la máscara con la muestra o wafer y empieza la exposición UV. El tiempo caracterizado de exposición óptimo fue de 22 segundos sobre la fotoresina positiva AZ 701 MIR, que a su vez estará relacionada con el

tipo de revelador empleado y tiempo de revelado.

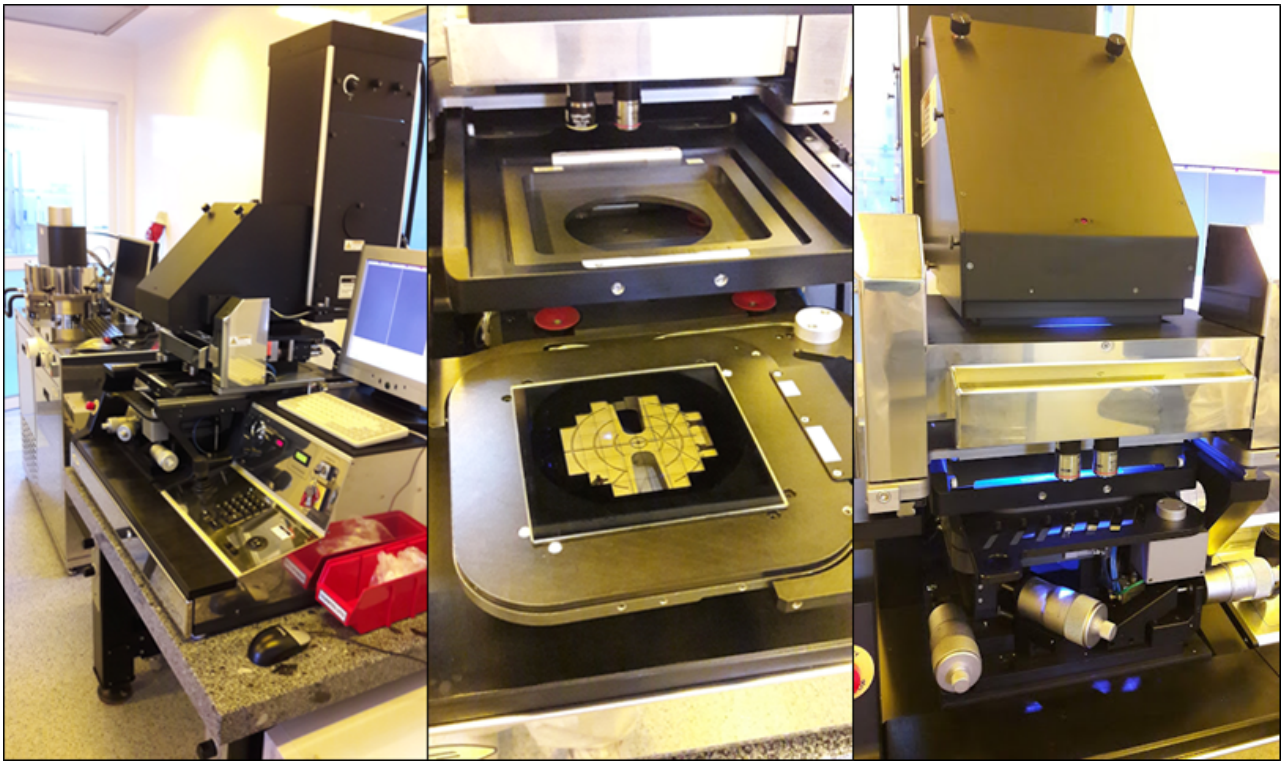


Figura 6.11: Izquierda: Alineador de máscaras comercial EVG620. Centro: Máscara ingresando a la campana de exposición. Derecha: Exposición UV de la muestra a través de la fotomáscara.

6.3.3. Caracterización del revelado

Después de la exposición, las zonas expuestas se diferencian químicamente de las zonas no expuestas. El propósito del revelador es disolver las áreas de fotoresina expuestas (en el caso de resistencias positivas) o no expuestas (en el caso de fotoresinas negativas), dando como resultado las estructuras de fotoresinas finales deseadas. El revelador elegido es el AZ 726 MIF, por la compatibilidad que tiene con la fotoresina AZ 701 MIR y además, porque contiene un aditivo que permite remover áreas de la fotoresinas ligeramente entrecruzadas, lo que genera patrones con una mejor definición. El proceso consiste en poner la muestra de nitruro de silicio con la fotoresina depositada y expuesta, en un *hot plate* durante 1 minuto a 90°C, luego se deja enfriar.

Luego, se prepara en un recipiente de vidrio el revelador AZ 726 diluido en agua desionizada en proporciones 5:2 respectivamente y se ingresa la muestra expuesta al revelador.

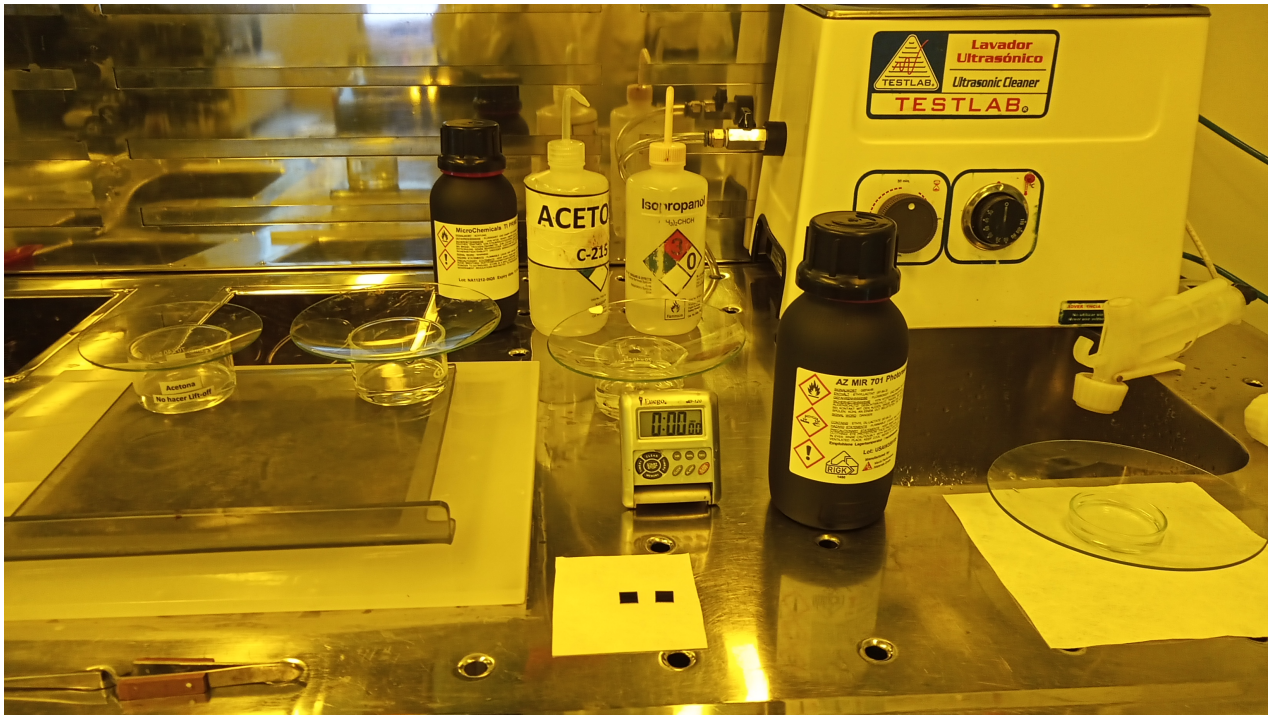


Figura 6.12: Mesada de litografía junto a un proceso de revelado.

Se caracterizó este proceso, y la receta obtenida fueron tiempos de revelado entre 25 a 30 segundos. Para controlar el ancho de las patrones y la calidad de la guías, se utilizó un perfilómetro óptico Veeco Wyco NT110, además microscopios Leica y Mitutoyo.

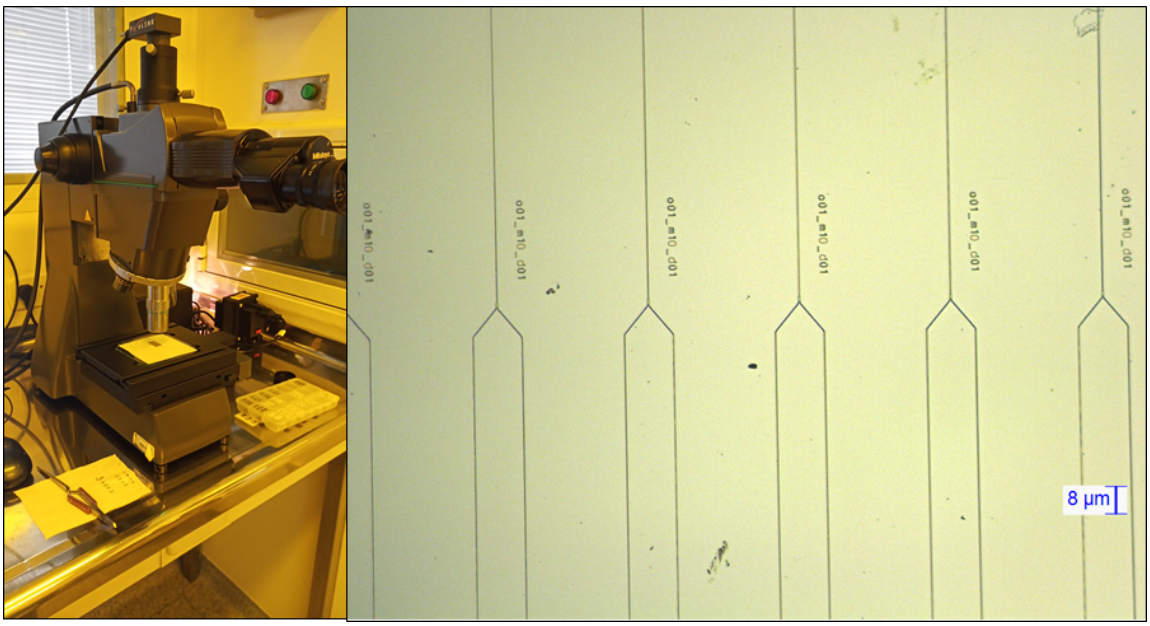


Figura 6.13: Izquierda: Control de patrones con microscopio. Derecha: Imagen capturada desde un microscopio Mitutoyo, se observan los patrones transferidos a la fotoresina luego del revelado.

6.3.4. Caracterización de los ataques físicos/químicos (*etching*).

El siguiente paso es definir las paredes de los patrones. La técnica empleada para grabar las paredes sobre la muestra son ataques del tipo RIE (*Reactive Ion Etching*). El ataque se realizó con el equipo comercial Oxford Plasmalab 80Plus (Figura 6.14), que tiene una configuración en triodo. Para atacar el nitruro de silicio, elegimos el Hexafloruro de Azufre (SF_6) como gas reactivo, debido a que tiene muy buena selectividad para reaccionar con Si_3N_4, y a la vez, tiene una baja selectividad para reaccionar con SiO_2.

En este proceso se pueden variar dos parámetros, la potencia de los generadores del plasma y el tiempo de ataque. Como el tiempo de ataque es lineal respecto de la cantidad de sustrato atacado, se fijó la potencia de los generadores y se caracterizó un tiempo de ataque continuo. La receta generada obtuvo una velocidad de ataque de 0.7 nm/s.



Figura 6.14: Izquierda: Equipo comercial Oxford Plasmalab 80Plus para realizar *etching*. Derecha: Foto capturada con microscopio Leica de un divisor de potencia 1x2, después de ataques RIE.

Las Figuras 6.15(a,b) y 6.16, muestran el corte transversal de una guía de onda fabricada, en la cual se pueden observar un efecto a optimizar: el ángulo de las paredes. La guía de onda fabricada tiene una sección transversal trapezoidal con un ángulo de (80±3)° con la horizontal, como se muestra en la Figura 6.16(c). En cuanto al ancho, las guías que se diseñaron para este análisis son de 1μm. Existe una diferencia entre la característica diseñada y los resultados. En la base de la guía de ondas, el ancho es alrededor de 30 nm menor que el diseño, mientras que

en la parte superior la diferencia es cercana a los 200 nm (Figura 6.15(b)). Estas diferencias son lo contrario para los espacios entre guías de onda. Esta discrepancia en los tamaños proviene del proceso de litografía donde se define la estructura de la PR. La particularidad que tiene la fotoresina positiva, es que aumenta el ancho de las guías de onda y al mismo tiempo reduce la separación entre ellas. Este efecto se puede compensar mediante una corrección puntual cuando los diseños digitales se transfieren al equipo (Figura 6.15(a)). Otra manera de corregir este efecto, es generando un plasma con mas potencia en el ataque RIE, con intervalos cortos en el tiempo de ataque. La energía del plasma generado en el RIE presenta forma de campana gaussiana, por lo tanto los iones laterales serán menos energéticos. Al darle más potencia a los iones, esta campana se suaviza, y el ataque se vuelve más equitativo entre las zonas centrales y externas, lo que puede mejorar el desprendimiento lateral de las paredes del sustrato que se está atacando.

Algo más que podemos destacar, es que fue posible comprobar la selectividad del ataque del RIE entre la PR, el Si_3N4 y el SiO_2. La Figura 6.16 (a) muestra la PR restante sobre las estructuras. Esta capa tiene alrededor de 150 nm de espesor, mientras que el plasma grabó completamente el Nitruro de Silicio desprotegido y dejó intacto el dióxido de silicio

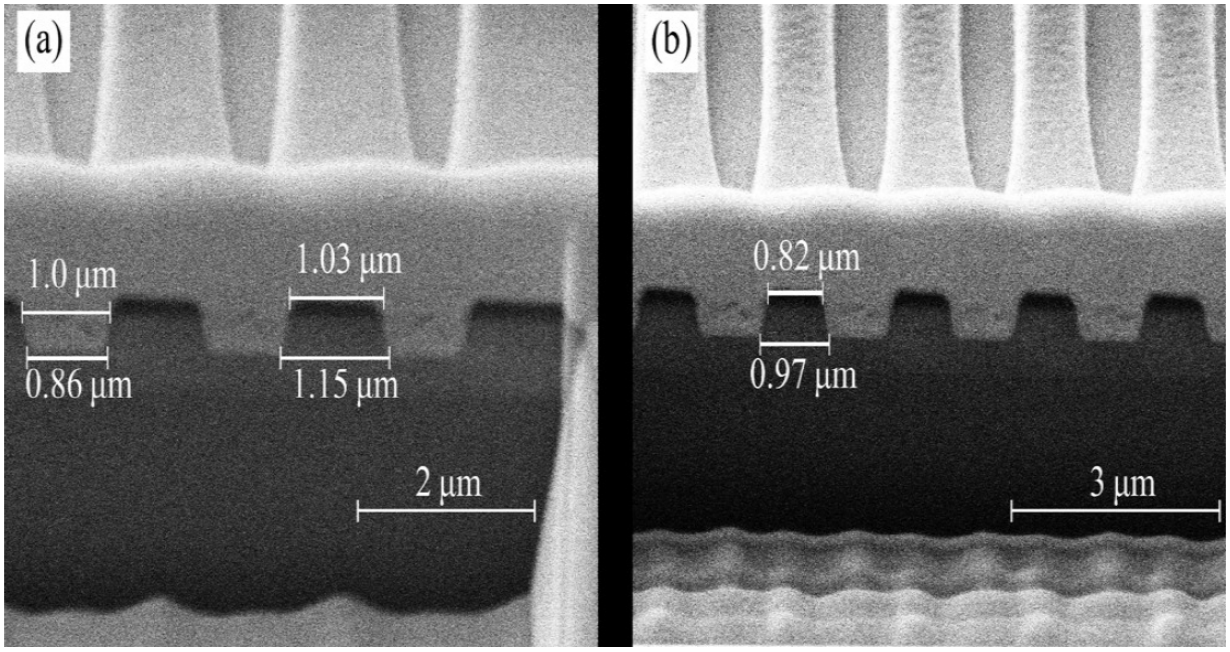


Figura 6.15: Imágenes FIB-SEM de estructuras fabricadas con Nitruro de Silicio. (a) Guías de 1 μm separadas por 860 nm. (b) Guías de 0.82 con base de 0.97 μm.

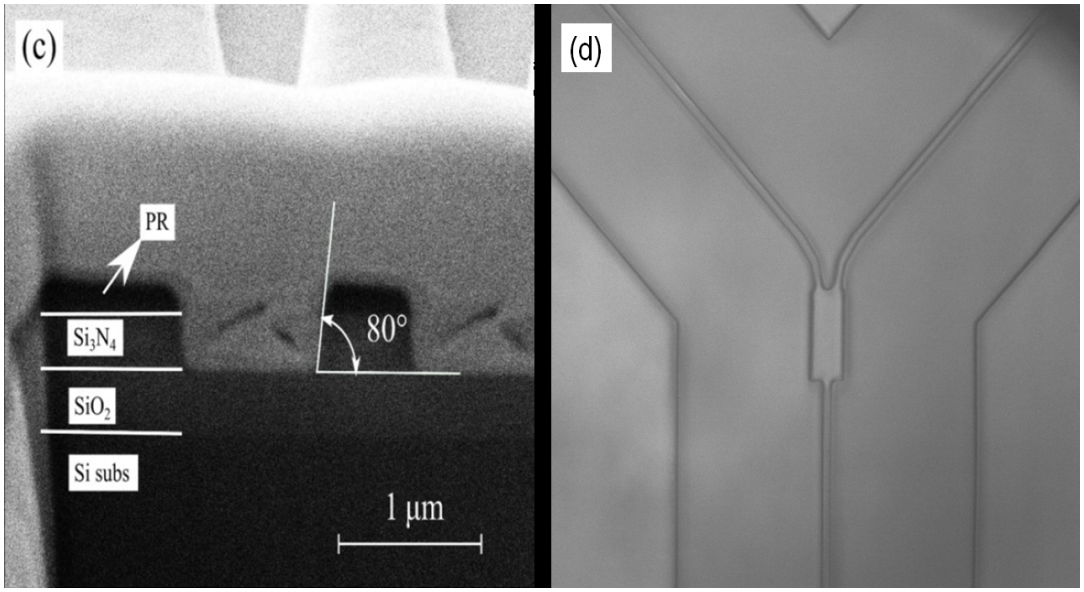


Figura 6.16: Imágenes FIB-SEM de estructuras fabricadas con Nitruro de Silicio. (c) Sección transversal de las guías de onda y la pila de tres capas más la PR, en donde se evidencia la pared angulosa. (b) Vista superior del dispositivo antes del corte FIB (*Focused Ion Beam*).

6.3.5. Medida de espesores con elipsometría

Se utilizó un elipsómetro Horiba AUTO/SE (Figura 6.17) para medir el espesor de películas de SiO_2 y Si_3N_4.

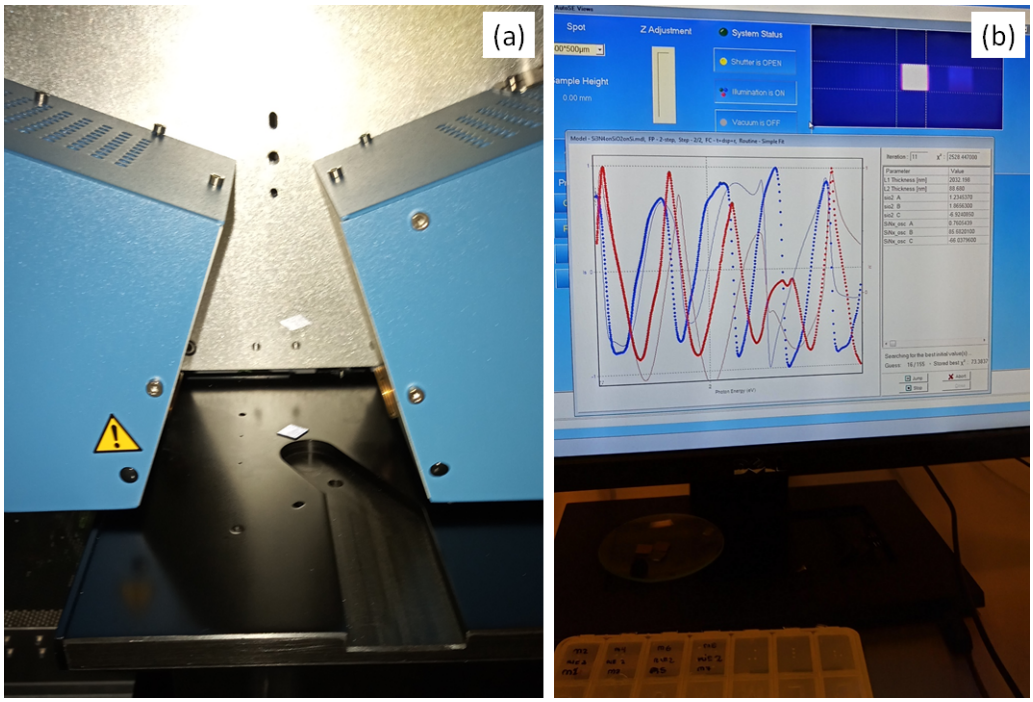


Figura 6.17: (a) Cámara interior del elipsómetro Horiba AUTO/SE midiendo el espesor de una muestra compuesta por $Si3N_4/SiO_2$. (b) Ajuste del modelo óptico con datos experimentales.

Un elipsómetro es un instrumento utilizado para caracterizar materiales delgados, como recubrimientos ópticos, semiconductores y películas delgadas. El elipsómetro utiliza luz polarizada que incide sobre la superficie de la muestra en un ángulo específico. Al interactuar con la muestra, la luz se refleja y su estado de polarización cambia en función de las propiedades ópticas y la estructura de la muestra. El haz reflejado pasa a través de un analizador que mide el cambio en la polarización de la luz. El elipsómetro detecta las componentes perpendicular y paralela del haz reflejado, y se mide la relación de las amplitudes ψ y la diferencia de fase Δ entre las ambas componentes [6]. Estos parámetros ópticos se usan para calcular el índice de refracción y el espesor de la capa delgada en la muestra. Se utiliza un modelo óptico que ajusta los datos experimentales para obtener las propiedades ópticas de la muestra. En este trabajo, utilizamos la ecuación de Sellmeier como modelo de dispersión. La ecuación de Sellmeier con $m = 3$ se puede expresar como:

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{B_1\lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2\lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3\lambda^2}{\lambda^2 - C_3}$$

El software de análisis de elipsometría del Horiba Auto SE, permite introducir la ecuación de Sellmeier para ajustar los datos de dispersión del índice de refracción. Los usuarios pueden ingresar los coeficientes B_i y C_i adecuados para un material en particular, y el software ajustará los datos medidos para proporcionar un modelo preciso de la variación del índice de refracción con la longitud de onda.

La caracterización de los ataques RIE se realizó en muestras de nitruro de silicio sin ningún proceso. Antes de atacar las muestras, mediante elipsometría se midieron los 300 nm de Si_3N_4 y 1500 nm de SiO_2 como indicaba el fabricante, luego, el nitruro fue atacado con iones de hexafloruro de azufre (SF_6), y se volvieron a medir las capas de nitruro y de dióxido de silicio, verificando que la capa de nitruro de silicio haya sido removida por completo, sin haber atacado la capa dióxido de silicio. Por otro lado, si vamos al otro extremo, cuando los tiempos de ataque se acercaban y superaban los 225 seg, la capa de nitruro de silicio desaparecía, pero la capa de dióxido de silicio empezaba a ser atacada considerablemente (efecto que no deseado). Por lo tanto, podemos trabajar con una ventana de tiempo de 45 seg y remover los 300 nm del nitruro sin atacar el dióxido de silicio, pero tener repetitividad y precisión es algo aún más complejo.

En la Figura 6.18, se muestra la caracterización del proceso.

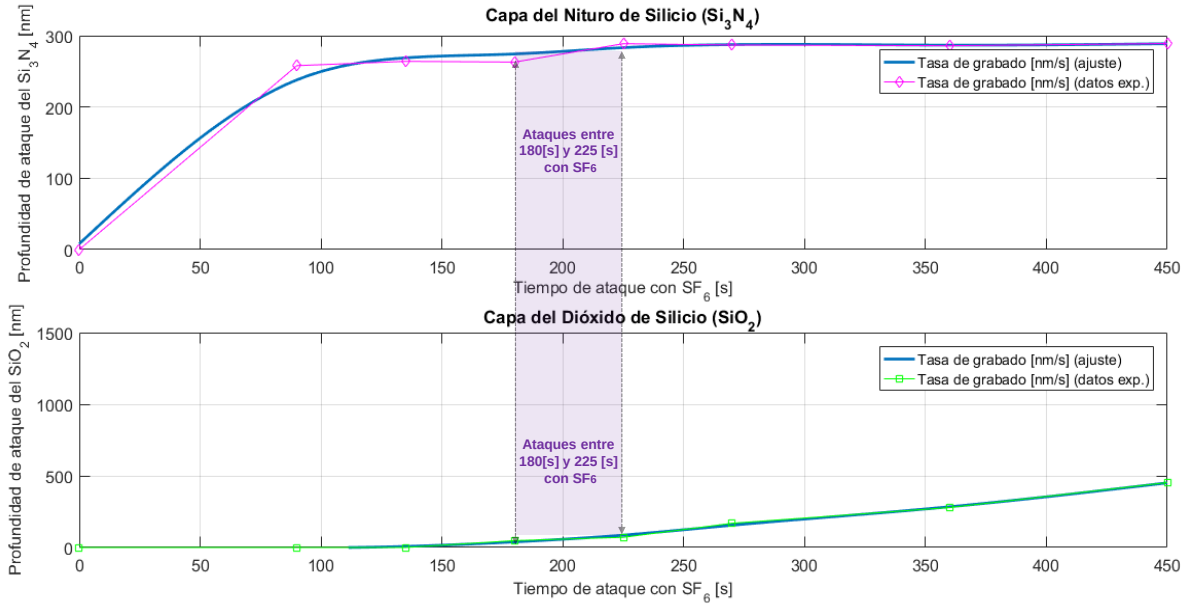


Figura 6.18: Caracterización de los tiempos de ataque sobre el nitruro de silicio.

Como resultado de la etapa de *etching*, se concluye que los tiempos óptimos para atacar completamente el nitruro oscilan entre 180 y 225 seg. En la mayoría de eventos, cuando el tiempo de ataque se acercaba y no superaba los 180 segundos, mediante la técnica elipsométrica se encontraban capas de nitruro de silicio del orden de 20 nm a 30 nm.

Trabajar en este intervalo de tiempo no asegura la eliminación de defectos en la calidad de las guías de onda, como la rugosidad y el ángulo de las paredes. Estas imperfecciones se deben principalmente a la atmósfera generada en la cámara RIE durante la creación del plasma, la cual está fuertemente influenciada por la temperatura de la cámara y la acumulación de residuos debido al uso del equipo.

Se realizan limpiezas periódicas tanto del plato donde se colocan las muestras como de la campana del RIE. Esto permite obtener una mayor repetitividad de los tiempos de ataque caracterizados, pero también conlleva a tiempos de proceso RIE más largos.

6.3.6. Remoción de fotoresinas.

Luego de los ataques RIE, es necesario retirar la fotoresina de las muestras o de la oblea. El proceso es muy sencillo, se debe colocar la muestra en acetona y agitarlo levemente hasta remover toda la fotoresina. No existe un tiempo determinado, solo se observa a simple vista o mediante microscopio si aún existen residuos

de fotoresina. Los paso de limpieza a seguir son : 1) sumergir y agitar las muestras en acetona. 2) Sumergir y agitar las muestras en isopropanol. 3) Sumergir y agitar las muestras en agua desionizada (DI). 4) Secar las muestras con una pistola de nitrógeno.

Otra opción para una limpieza de mejor calidad, es ingresar las muestras nuevamente al RIE y remover la fotoresina con plasma de oxígeno. Como los ataques RIE desprenden partículas que se van depositando sobre las muestras, es conveniente hacer una vez más la limpieza previamente descrita.

La tabla 6.1 presenta la receta utilizada para la fotoresina 701 MIR.

AZ MIR 701 - 1 μm	**(FR de alta resolución)**
Depósito:	Receta 21 a 4000 rpm (provisoria)
Pre-cocido:	1 minuto a 90 °C
Re-humificación:	no es necesario
Exposición:	22 segundos (30s)
P.E.B.:	1 minuto a 110 °C
Revelado:	Según tamaño de sustrato: ▪ Oblea 2" = 1 minuto (5:2 $\sim$ AZ726:H2O DI) **(no está caracterizado).** ▪ Muestra 5x5mm 40 seg.
Remoción:	▪ Acetona ▪ Plasma de oxígeno a temperatura con Asher

Tabla 6.1: Receta de la fotoresina 701 MIR.

El término *Post Exposure Break* (PEB) "horneado post-exposición", se refiere a un proceso de calentamiento de la fotoresina que se realiza después de la exposición. Dado que la película de resina aún no está desarrollada y permanece cerrada, el PEB puede aplicarse fácilmente incluso por encima de la temperatura de ablandamiento de la fotoresina. En este artículo [7] de MicroChemicals, se explican varias razones diferentes por las cuales es conveniente realizar un PEB.

6.3.7. Corte de obleas.

Otra etapa en el proceso de fabricación de chips fotónicos, es el método elegido para cortar la obleas *wafers*. En trabajo usamos una cortadora de obleas, también conocida como *dicing saw*, es una herramienta importante en la fabricación de

semiconductores y circuitos integrados. Su función principal es cortar los *wafers* de silicio en chips individuales.

Primero, se hace un diseño de las líneas por donde va a pasar la cuchilla, con las dimensiones finales de los chips (Figura 6.19 (1)). Si se desea hacer un corte manual, también se puede usar para trazar marcas por debajo de la oblea, y así facilitar un posterior clivado.

La oblea se monta en una cinta adhesiva que se estira sobre un marco de soporte. Esto asegura que los chips individuales permanezcan en su lugar después del corte. La oblea se alinea cuidadosamente para asegurarse de que los cortes se realicen en las ubicaciones correctas. Se selecciona una hoja de diamante adecuada para el material y el grosor de la oblea. Luego, se configuran parámetros como la velocidad de corte, la profundidad de corte y la velocidad de avance.

La hoja de diamante comienza a cortar la oblea siguiendo líneas predefinidas, estas líneas suelen ser espacios entre los circuitos en la oblea. Durante el corte, se usa un chorro de agua o un refrigerante para evitar que la hoja y la oblea se sobre calienten y para eliminar los residuos de corte, como se muestra en la Figura 6.19 (2)

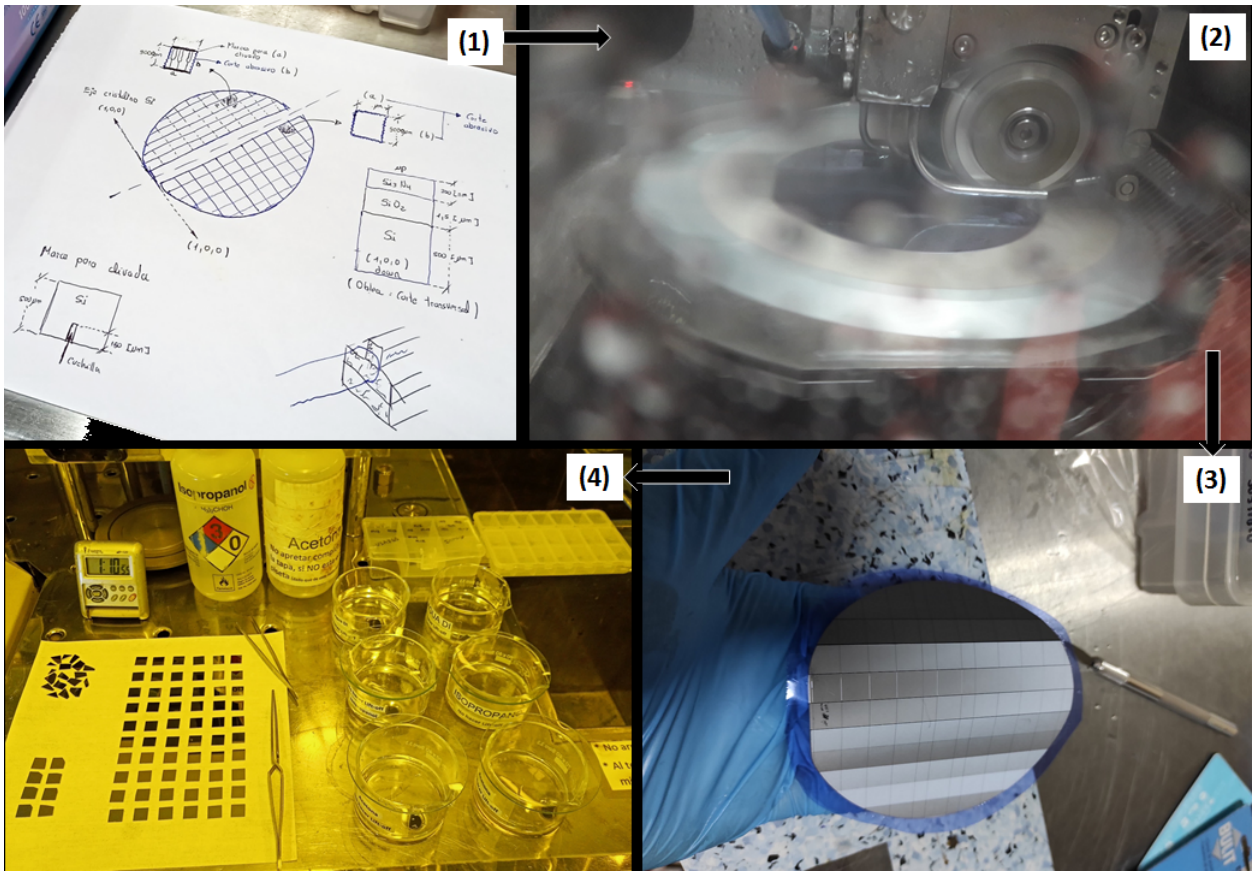


Figura 6.19: Proceso de corte de wafers de nitruro de silicio.

Después del corte, se inspeccionan las muestras o chips para asegurarse de que no haya daños o defectos, Figura 6.19(3).

Las muestras cortados se recogen y se preparan para el siguiente paso en el proceso de fabricación (Figura 6.19(4)), como pueden ser procesos litográficos o interrogación de los dispositivos integrados en el chip y empaquetado.

6.3.8. Chips fabricados.

En la Figura 6.20, se presenta los resultados de chips fabricados y diversos dispositivos fotónicos integrados de interés que han pasado por todos los procesos de micro-fabricación.

En la figura 6.21, se muestran los progresos de los procesos de fabricación CMOS, adaptando las recetas estándar para aplicaciones en la fotónica de silicio.

Finalmente, en la Figura 6.22 se muestra un resumen de los resultados obtenidos de los procesos de micro-fabricación, junto los tiempos característicos de las recetas utilizadas en cada etapa.

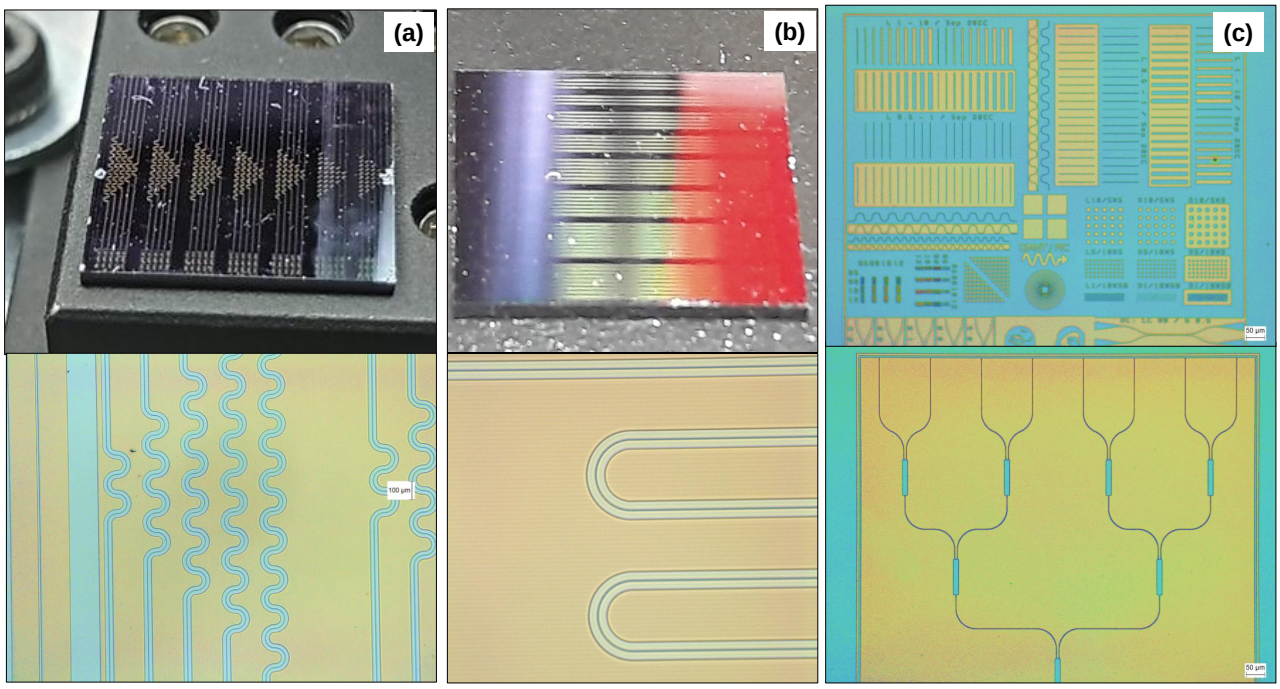


Figura 6.20: Chips y dispositivos fotónicos fabricados en Nitruro de Silicio. a) Guías con forma de serpentinas para medir pérdidas por curvaturas. b) Guías largas con radios de curvatura suaves para medir pérdidas por propagación, c) Arriba: patrones de calibración. Abajo: Divisores de potencia MMI 1X8 estándar.

6.3.9. Resumen procesos de micro-fabricación.

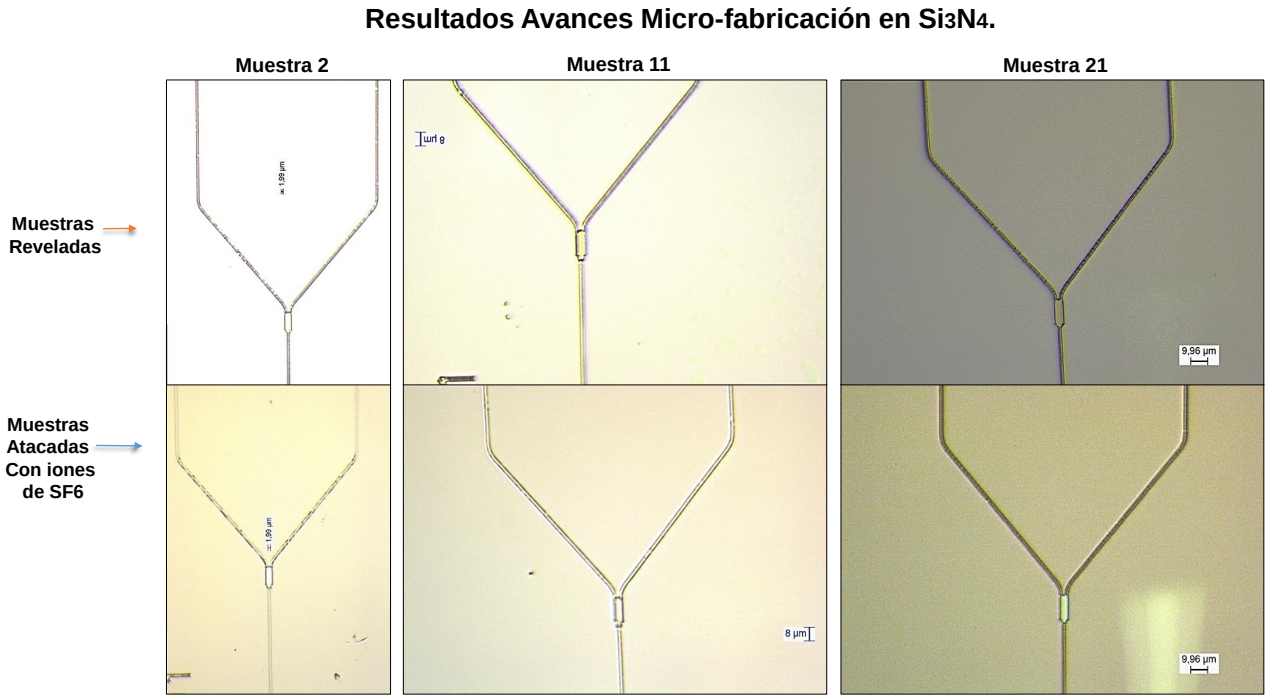


Figura 6.21: Progresos de fabricación de los dispositivos ópticos integrados en nitruro de silicio.

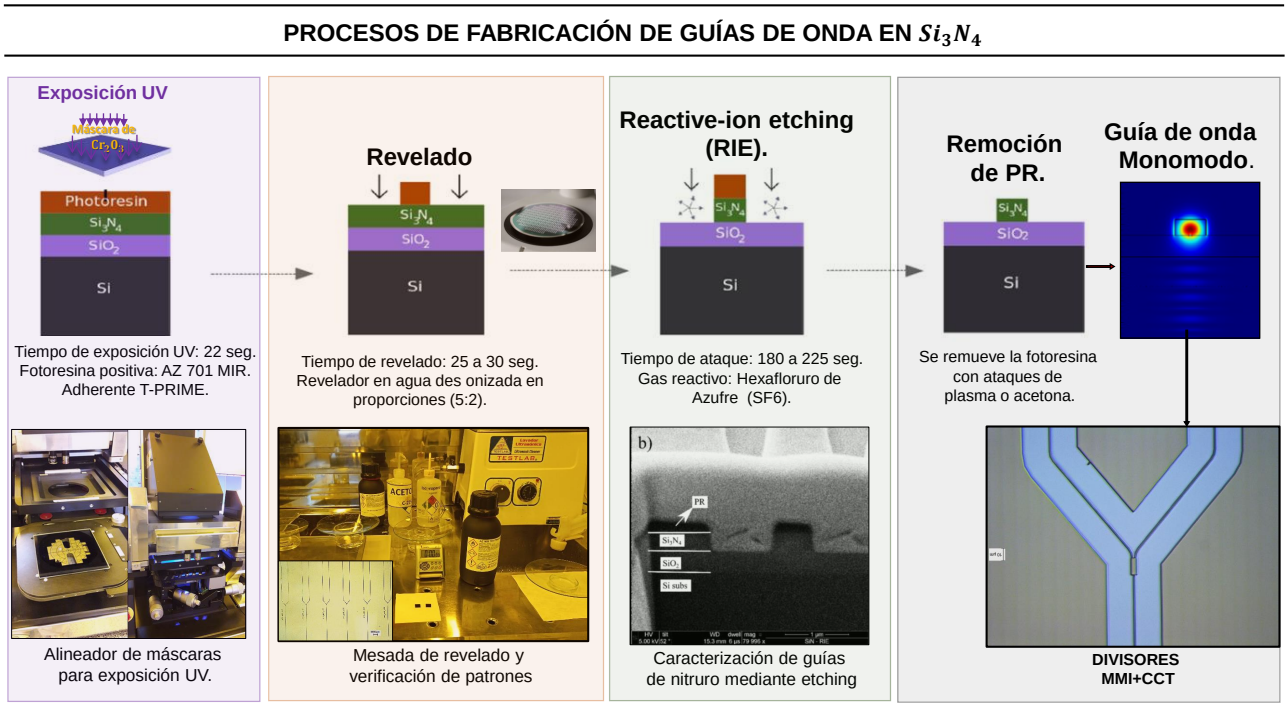


Figura 6.22: Resumen de los procesos de micro-fabricación desarrollados en la sala limpia del Departamento de Micro y Nanotecnología - CNEA.

6.3.10. Efecto borde.

En la sección 4.3.5 se introdujo la técnica de deposición de fotoresinas sensibles a la radiación UV, como la AZ 701 MIR mediante *spin coating*. En esta sección, analizamos el efecto de depositar fotoresinas sobre muestras cuadradas. Para ello, las muestras se colocan en un plato dentro de una centrifugadora que gira a 4000 rpm. Esta velocidad permite que el fluido se extienda sobre el sustrato, pero además, la fuerza centrífuga hace que la solución fluya hacia los bordes (efecto borde de la Figura 6.23), donde se acumula hasta ser expulsada cuando se excede la tensión superficial. Esto es una etapa crítica en la litografía, porque genera una variación en el grosor de la película depositada, lo que afecta a las siguientes etapas de exposición y revelado. Debido al alto contenido de solvente residual en el borde elevado, incluso después del secado inicial con un *hot plate*, la máscara puede adherirse a la película de fotoresina. El borde elevado también actúa como un gap no deseado entre la película de fotoresina y la máscara durante la exposición, lo cual es a menudo la causa de una mala resolución [8], lo que genera dimensiones incorrectas, o un ángulo lateral no intencional entre el *wafer* y la fotomáscara.

En este trabajo se cortaron obleas de Si_3N_4 y se hicieron pruebas en muestras cuadradas. De esta manera durante la caracterización de los procesos litográficos, evitamos usar la oblea entera, lo cual resulta en un ahorro considerable de material.

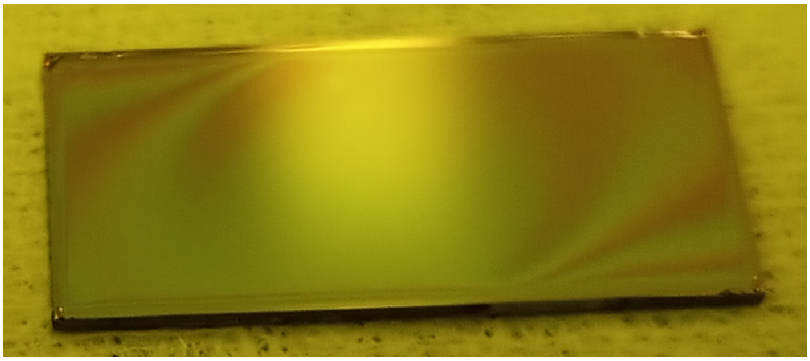


Figura 6.23: Efecto borde después de depositar fotoresina por *spin coating*.

Para resolver el efecto borde mostrado en la Figura 6.23, se decidió cortar la oblea de nitruro en muestras rectangulares de 1 cm x 2 cm. Previo a estos cortes rectangulares, se hicieron marcas en el *bulk* de silicio por debajo de la oblea con distintas profundidades, desde 150 μm hasta 300 μm (Figura 6.19 (1)), siguiendo algún eje preferencial del silicio cristalino (1,0,0), utilizando el mismo equipo de corte de obleas. Estas marcas están ubicadas a 5.1 mm de los extremos izquierdo y derecho, delimitan las zonas en donde se genera un exceso de fotoresina después

del *spin coating*. Además, sirven para facilitar un posterior clivado. Las secciones de 5.1 mm se separan de la muestra después del *etching*, por lo tanto, el área efectiva final del chip será de 900 μm x 900 μm.

Insertar estas marcas tuvo tres ventajas muy claras. Primero, previo a ingresar las muestras con fotoresina depositada al alineador de máscaras, se puede remover manualmente (con un paño) el exceso de fotoresina en los bordes de las zonas de 5.1 mm con un removedor (EBR). Esto permite reducir el gap entre la muestra y la fotomáscara, reduciendo la difracción de la luz al momento de transferir los patrones desde la fotomáscara hacia la muestra con fotoresina, como se explicó en la sección 6.3.2. La segunda ventaja de estas marcas en el *bulk* de silicio, es que mejoró la probabilidad de un clivado exitoso en las muestras de nitruro. El clivado es una técnica que consiste en presionar con una punta de diamante sobre el silicio cristalino, y se corta siguiendo algún eje preferencial que dependerá de la estructura cristalina del que está compuesto el silicio [9]. Por lo tanto, se aplica una fuerza con la punta de diamante en uno de los cantos del chip (en la capa de nitruro de silicio) en algún punto donde empiezan las marcas (ver Figura 6.24). Esto permite que la red cristalina (1,0,0) se rompa siguiendo la tendencia de estas marcas. Como resultado, los cortes de los bordes quedan más lisos en comparación con los cortes realizados previamente con la cortadora de obleas, siendo esta última la tercera ventaja, aunque en muchos casos es necesario un pulido, pero menos laborioso.

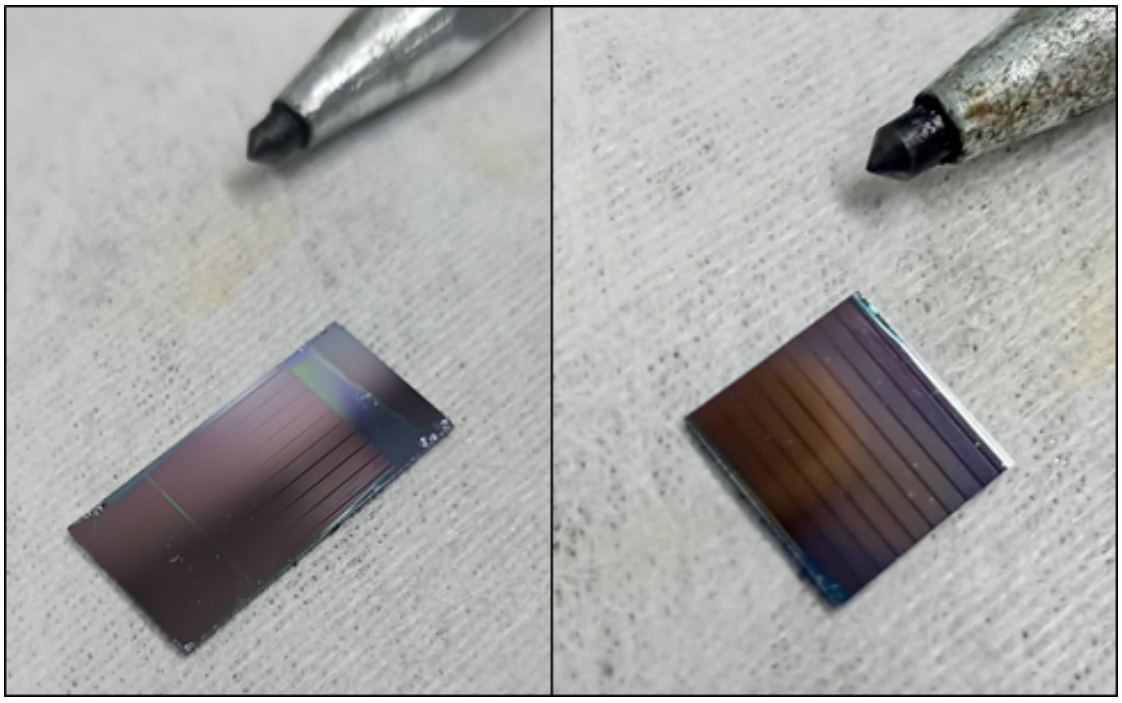


Figura 6.24: Clivado con punta de diamante y solución al efecto borde.

Las marcas se encuentran dentro de los límites de las entradas y salidas de los dispositivos, de esta manera nos aseguramos que después del clivado, las guías de onda de nitruro queden expuestas en el borde para su posterior inyección de luz láser.

6.3.11. Pulido de bordes.



Figura 6.25: Pulido de los bordes de un chip de Nitruro de Silicio.

En el caso de que los bordes clivados no queden lo suficientemente lisos, los bordes se pueden someter a un proceso de pulido.

El proceso de pulido se lleva a cabo manualmente, sujetando la muestra de nitruro de silicio (Si_3N_4) entre dos sustratos de silicio Si y cera, formando un "sandwich" como se muestra en la Figura 6.25. El borde libre del chip es sometido a varias etapas de pulido (entre 3 y 4 etapas). En cada fase, se emplea una pasta pulidora que contiene granos de diamante de diversos diámetros, ordenados de mayor a menor en la escala de micrones. Este método progresivo permite refinar gradualmente el borde, asegurando que el resultado final sea un borde con calidad óptica.

La desventaja que tiene este proceso, es que es largo y tedioso, porque debe realizarse en los bordes de entradas y salidas de los dispositivos del chip, y cada etapa de pulido puede durar horas. La gran ventaja de esta técnica es que mejora absolutamente el acople de luz láser por el canto.

En la siguiente sección vamos abordar distintos esquemas experimentales para acoplar luz láser por el borde del chip fotónico.

6.3.12. Sistema experimental de acople óptico por borde en chips fotónicos.

La consideración principal al testear y empaquetar chips fotónicos de silicio, es el método de conexión a los chips. Esto puede implicar conexiones tanto ópticas como eléctricas. En esta sección vamos a desarrollar distintos métodos ópticos para acoplar luz láser por el canto de los chips (*edge couplers*), y secciones más adelante vamos a introducir el método óptico de acople vertical (*grating coupler*). Ambos métodos se desarrollaron en el Centro de Investigaciones Ópticas La Plata (CIOp), del campus tecnológico de la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC-CONICET).

6.3.13. Montaje del sistema mediante acople *edge couplers*.

Se realizó un montaje de un sistema opto-electrónico, para ello se utilizaron varios esquemas en el intento de acoplar luz láser a través de los bordes del chip fotónico. A continuación, se detalla el equipamiento más relevante:

- Láser sintonizable 1528 - 1563 nm, 15 mW.
- Sensor de potencia S122C: fotodiodo estándar, Ge, 700 - 1800 nm, 50 nW - 40 mW.
- Medidor de potencia óptica: Thorlabs PM101U.
- Tapa adaptadora de fibra con SM1 interno: S120-APC2.
- *Lensed Fibers* monomodo TSMJ-3A-1550-9/125-0.25-7-2.5-14-2.
- Fibras ópticas monomodo.
- Posicionadores de traslación (x-y-z), y angulares (α-β-γ) mecánicos con resolución sub-micrométrica.

El 1er esquema se muestra en la Figura 6.26, esta configuración cuenta con 3 posicionadores, todos con movimientos de traslado (x,y,z) y movimientos angulares (α, β, γ). El posicionador de la derecha (1) es el encargado de trasladar una *lensed fiber* de entrada láser hacia el chip. La distancia de trabajo óptima para hacer foco entre la fibra y el canto del chip según el fabricante son $14\mu m$. Por otro lado, el posicionador central (2) sujeta el chip, y su función es desplazarse a través de las distintas entradas/salidas de cada uno de los dispositivos integrados en el chip. El posicionador de la izquierda (3), también tiene adaptado una *lensed*

fiber, y la función que cumple es recolectar la luz transmitida hacia un medidor de potencia Thorlabs PM101U, para su posterior procesamiento de señales.

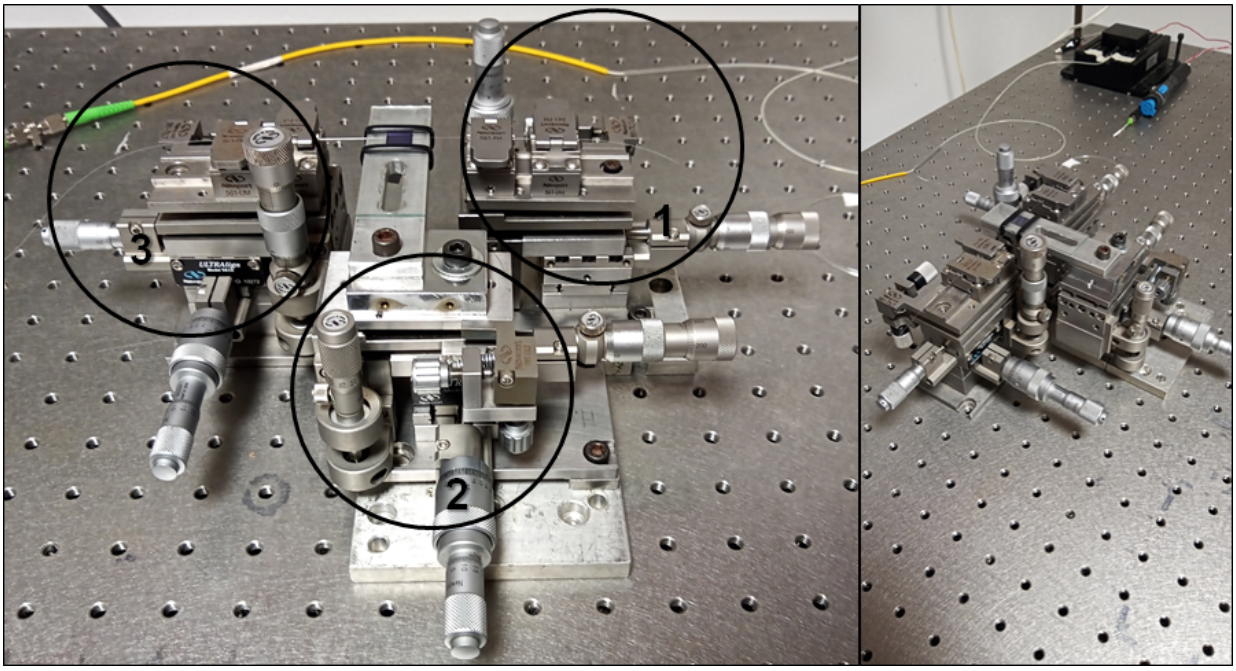


Figura 6.26: Primer esquema del montaje para el testeo de transmisión óptica.

Con este esquema, sería más factible caracterizar los dispositivos integrados, debido a que la *lensed fiber* de salida esta conectado al medidor de potencia que se comunica con una PC, lo que permite un procesamiento de datos y análisis de la respuestas de los dispositivos, pero en el camino se encontraron varias dificultades. La primera es la complejidad de acoplar luz manualmente con las *lensed fiber* a la entrada y a la salida en simultáneo. El alineamiento de las fibras con las guías de onda no es trivial, las paredes de las guías de nitruro tienen un ancho $w = 1.5\mu$m y altura de $h = 300nm$, a todo esto, la distancia focal de $14\mu m$ entre las *lensed fiber* y el borde del chip no es fácil de mantener en simultáneo. Con este configuración, (ideal para una rápida caracterización) es difícil acoplar luz manualmente por la cantidad de grados de libertad que tiene el sistema, así mismo, poder determinar que parte del sistema se debe refinar para un correcto alineamiento es una tarea complicada, además se debe tener en cuenta que los dispositivos integrados tienen defectos de micro-fabricación. La complejidad que conlleva el testeo de la transmisión óptica con este tipo de montajes, hizo que se buscaran nuevas alternativas y poder reducir estos factores.

En base a la primera configuración experimental, se implementó una estrategia que facilite el acoplamiento. En lugar de utilizar dos *lensed fiber* (entrada y salida), se decidió sustituir la *lensed fiber* de salida, por un posicionador con

una lente objetivo microscopio 20x, seguida de una cámara CCD Newport con sensibilidad en el rango visible hasta el infrarrojo (Figura 6.27), la misma está equipada con cuatro filtros neutros. El procedimiento implica la inyección de luz visible y mediante el objetivo 20x de salida, se realiza la alineación para que la salida quede centrada en el sensor de la cámara.

Luego, ubicamos las *lensed fiber* de entrada en las proximidades del borde del chip, como se muestra a la izquierda de la Figura 6.28. El eje z de la *lensed fiber* de entrada se posiciona lo más cercano posible de la superficie del chip, específicamente del lado de las guías de nitruro de silicio. Esta disposición provoca una dispersión de la luz a lo largo de la superficie del chip. Del lado de la cámara CCD, se puede observar el patrón de interferencia resultante, como se ilustra a la derecha de la Figura 6.28. Este patrón varía según la posición z de la *lensed fiber*, mostrando una alta sensibilidad ante cualquier ajuste en el eje z. Se realiza un ajuste fino hasta lograr que las líneas del patrón de interferencia observado se ensanchen, lo que nos indica que estamos posicionados en altura, apenas por encima del chip y a la entrada de las guías de onda de nitruro de silicio.

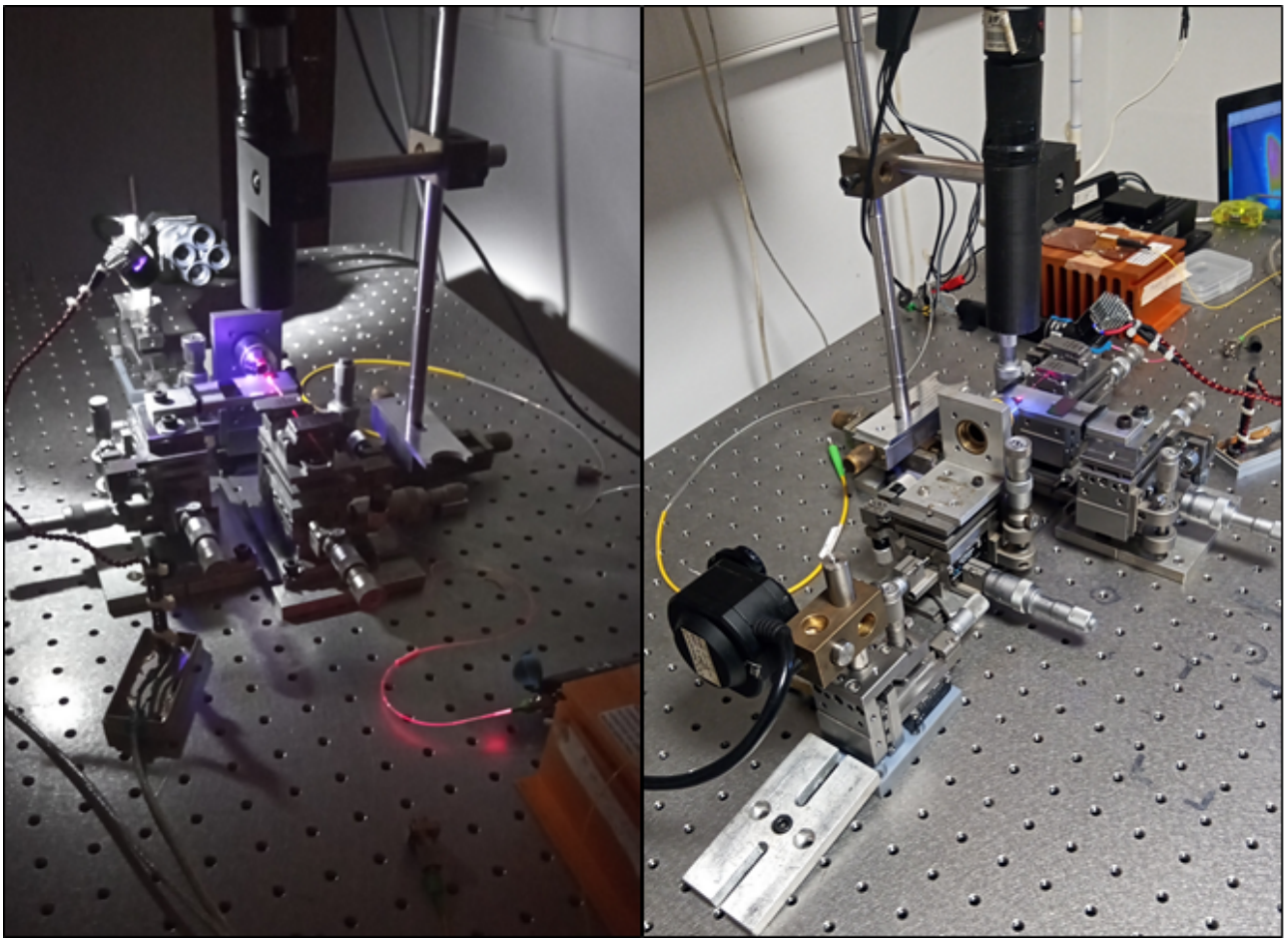


Figura 6.27: Segundo esquema. Alineamiento láser de salida con cámara CCD.

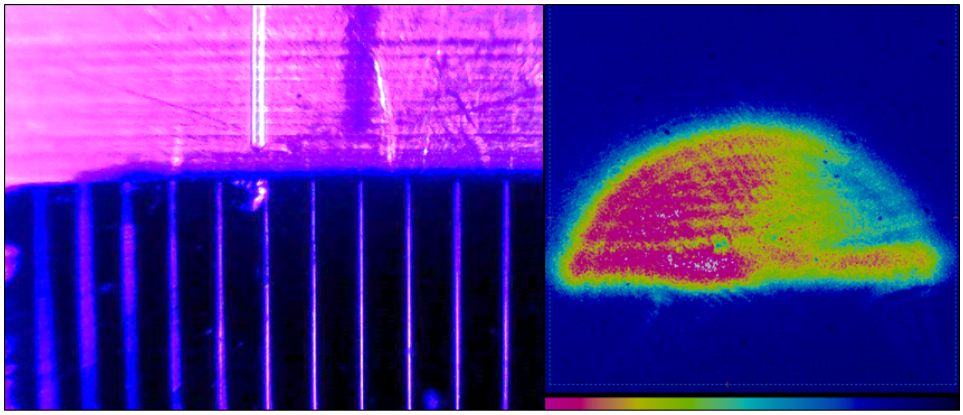


Figura 6.28: Acople por borde. Izquierda: Posicionamiento (x,y) de la *lensed fiber* en entrada con el método *edge coupler*. Derecha: Patrón de interferencia generado por la superficie del chip registrado por la cámara CCD Newport.

Una vez posicionado en este punto, la luz visible es absorbida por las guías de Nitruro de Silicio (Figura 6.29). Se procede a cambiar el láser rojo de entrada que nos permitió alinear y posicionar el trayecto óptico, por un láser infrarrojo. Entonces se inyecta luz en la banda C (las dimensiones de las guías fueron diseñadas para esta banda), y bajo el mismo esquema de observar el patrón de interferencia con la cámara CCD con sensibilidad en el infrarrojo, se empieza a recorrer el chip para interrogar los dispositivos integrados, hasta observar un modo a la salida de las guías de onda de Nitruro de Silicio.

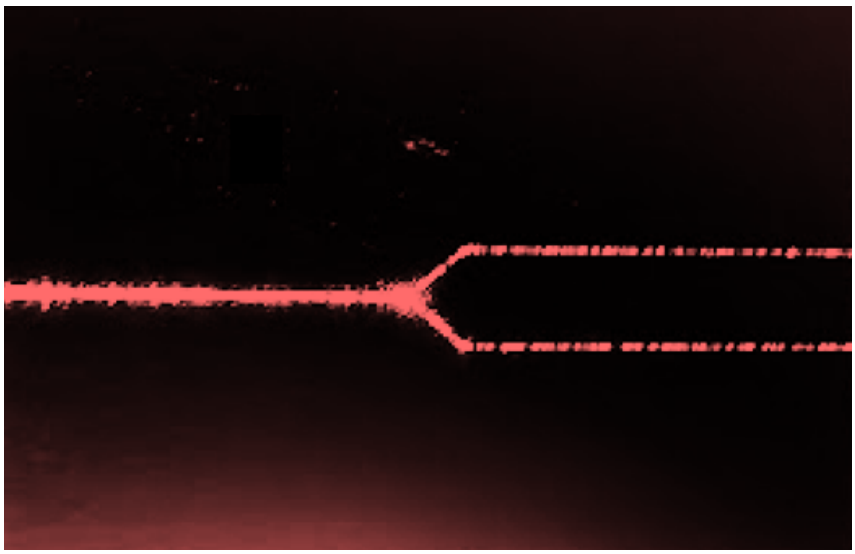


Figura 6.29: Captura de microscopio de la luz visible guiada en los dispositivos.

La caracterización de dispositivos integrados en la plataforma tecnológica de nitruro de silicio, acoplados mediante *edge couplers*, es un trabajo que se continuará realizando en el futuro.

Referencias

[1] LibreCAD Community. *LibreCAD: Free Open Source 2D CAD*. Accessed: 2023-06-20. 2024. URL: https://librecad.org/.

[2] KLayout Community. *KLayout: Layout Viewer and Editor for IC Design*. Accessed: 2023-06-20. 2024. URL: https://www.klayout.de/.

[3] J. J. Biafore et al. «Python in Electronic Design Automation». En: *Proceedings of the Python in Science Conference*. 2017, págs. 85-92. URL: https://conference.scipy.org/proceedings/scipy2017/pdf/biafore.pdf.

[4] M. Kharitonov, O. Vyhmyannikova y V. Vladimirov. «Automated Layout Generation with Python and gdspy». En: *Journal of Computational Electronics* 18.2 (2019), págs. 299-311. DOI: 10.1007/s10825-019-01352-5.

[5] MicroChemicals. *Exposure of Photoresists*. https://www.microchemicals.com/dokumente/application_notes/exposure_photoresist.pdf. Accessed: 2024-07-31.

[6] Miquel Garriga y Maria Isabel Alonso. «Caracterización estructural mediante elipsometría espectral de multicapas basadas en SiO2». En: *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio* 39.6 (2011), págs. 729-734. ISSN: 0366-3175. DOI: 10.3989/cyv.2000.v39.i6.773.

[7] MicroChemicals GmbH. *Photoresist Post Exposure Bake (PEB)*. Accessed: 2024-07-30. URL: https://www.microchemicals.com/dokumente/application_notes/photoresist_post_exposure_bake_peb.pdf.

[8] MicroChemicals. *Spin Coating Photoresist*. https://www.microchemicals.com/dokumente/application_notes/spin_coating_photoresist.pdf. Accessed: 2024-07-31.

[9] Dieter K. Schroder. *Semiconductor Material and Device Characterization*. 3rd. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2006.

Capítulo 7

Divisores de potencia ópticos integrados en silicio.

Índice

7.1. Acoplamiento coherente en dispositivos fotónicos integrados. . . . 187

7.2. Diseño de Divisores de potencia 1x2, 1x4 y 1x8 basados en SCC (*Coherence Coupling Theory*) y MMI (*Multi Mode Interfereance)* desarrollados en SOI y Si_3N_4. 189

7.3. Diseño de divisores de potencia integrados en Si_3N_4 189

7.3.1. Optimización del diseño. 190

7.3.2. *Layout* y fabricación 194

7.4. Diseño, fabricación, pruebas y empaquetado del divisor de potencia desarrollado bajo la plataforma SOI. 198

7.4.1. La industria fotónica exige procesos fáciles y fiables. 198

7.4.2. Diseño de divisores de potencia integrados en SOI 200

7.4.3. Layout del chip fotónico. 203

7.4.4. Fabricación de divisores de potencia integrados en SOI. 204

7.4.5. Sistema de acople óptico 206

7.4.6. Proceso de pre-alineación. 209

7.4.7. Caracterización de Divisores de potencia 1x2, 1x4 y 1x8 SCC + MMI bajo la plataforma SOI. 212

7.4.8. Integración del acoplamiento chip-fibra y pruebas en tiempo real. . . . 217

7.4.9. Empaquetado (diseño, integración e instalación de interfaces de E/S) . 219

Este capítulo describe el desarrollo completo de divisores de potencia ópticos integrados 1x2, 1x4 y 1x8 utilizando la tecnología de silicio, implementado en las plataformas del silicio sobre aislante (SOI) y nitruro de silicio (Si_3N_4), desde el diseño, fabricación, *test* y *packaging* de los mismos. El diseño y caracterización de los divisores de potencia 1x2 en SOI fueron analizados previamente en la tesis doctoral [1] de la autoría de mi colega R.R. Peyton, en donde se propone un diseño basado en la teoría del acoplamiento coherente (SSC) e interferencia multimodal (MMI), que resulta ser compacto y presenta bajas pérdidas de inserción. Se optimizan las dimensiones y se analiza la sensibilidad de los parámetros mediante simulaciones numéricas, en cada una de estas plataformas tecnológicas. En esta sección se presenta este análisis mencionado para entrar en contexto, y además se profundiza y presenta la caracterización divisores de potencia escalados a 1x4 y 1x8 convencionales y el propuesto SSC+MMI.

Los dispositivos basados en SOI se fabricaron mediante el servicio *multi-proyect-wafer* (MPW) de la *foundrie* CORNERSTONE [1]. Se caracteriza el rendimiento del divisor de potencia 1x4, 1x8 propuesto y se compara con componentes estándar comúnmente usados en la industria de la fotónica integrada. Finalmente, en esta sección se presenta el trabajo realizado del ensamblaje, curado y pegado del chip con las fibras ópticas. Luego, se fabrica el *case* del divisor mediante impresión aditiva, el mismo hace de soporte del chip con el *array* de fibras ópticas con sus respectivos conectores I/O y periféricos.

Por otro lado, los dispositivo basados en nitruro de silicio Si_3N_4, fueron fabricados en la sala limpia del Departamento de Micro y Nanotecnología (DMNT) del Centro Atómico Constituyentes (CAC-CNEA). Este enfoque nos permitió explorar a fondo los procedimientos y procesos industriales utilizados en la producción en masiva de chips con esta tecnología. Los procesos de fabricación de divisores de potencia SCC+MMI basados en Si_3N_4, fueron explicados detalladamente en la sección anterior 6.

7.1. Acoplamiento coherente en dispositivos fotónicos integrados.

A diferencia de los circuitos electrónicos donde el enrutamiento eléctrico se puede realizar de manera flexible, el enrutamiento óptico está limitado por condiciones

[1]Facility gestionada por un conjunto de universidades del Reino Unido y empresas dedicadas a la producción de semiconductores que ofrecen servicios MPW. Para más información ingresar a la página web: https://www.cornerstone.sotonfab.co.uk

ópticas o limitaciones tecnológicas. Cada diseño debe realizarse considerando las reglas de diseño de un proceso CMOS. Por ejemplo, muchos componentes fundamentales (como Y-branch) utilizados en la fotónica integrada, muestran un mejor rendimiento si se emplean esquinas afiladas e interpolación *spline*, pero generalmente violan las reglas de diseño del proceso de fabricación que se detallan en [2]. Para resolver estos problemas, las geometrías a partir del acoplamiento coherente simplificado (SCC), pueden generar curvaturas abruptas en varias secciones.

El acoplamiento coherente simplificado (SCC: *Simplified Coherent Coupling*) es una técnica para doblar la luz a través de pequeñas guías de ondas rectas con una curvatura pronunciada. Varios estudios ya han informado sobre guías de onda curvas y divisores con dispositivos de bajas pérdidas, compactos y eficientes en comparación con otros tipos de geometrías [3] [4]. Físicamente, la luz desacoplada en una curva se puede volver a acoplar en una curva posterior si la diferencia entre la fase de los modos (guiado y no guiado) es un múltiplo impar de π (Fig.(a) 7.1). Las pérdidas por curvatura son una función periódica que depende en gran medida de la longitud de la sección, de la diferencia entre el índice efectivo del modo guiado y el índice efectivo promedio ponderado de los modos no guiados excitados en la curva. Además, las pérdidas por curvatura dependen de la longitud de onda inyectada al dispositivo, debido al proceso de acoplamiento entre los modos guiado y radiado.

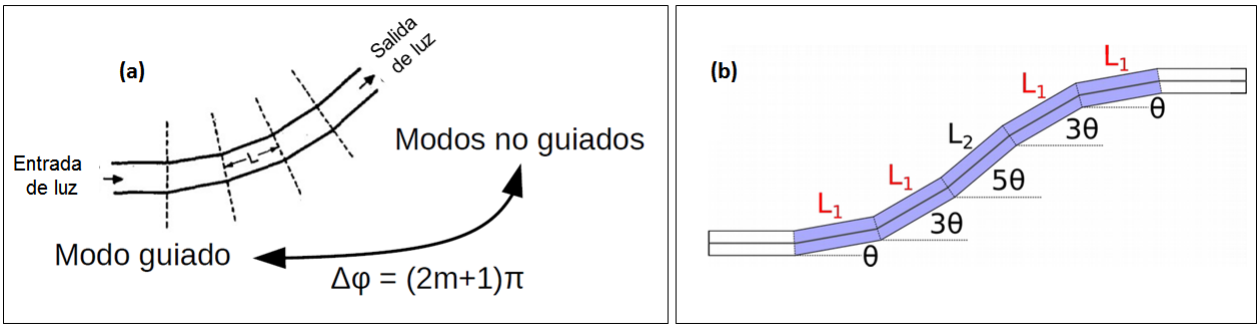


Figura 7.1: (a): Esquema del acoplamiento coherente simplificado (SCC). (b): Innovación en el diseño del SCC.

En la década de 1980 Jhonson et al. han demostrado que optimizando la longitud de las rectas se reduce en gran medida las pérdidas por curvas [5]. En el año 2002 Su y Wang presentaron un diseño simplificado del acoplamiento coherente, desarrollaron geometrías aún más compactas y con menores pérdidas que sus precedentes [6]. La innovación se basó en eliminar la variación de fase del frente de onda en cada curvatura por medio del cambio del ángulo entre cada tramo

(Fig.(b) 7.1). A partir de estos resultados, en el año 2003 Hsu et al. propusieron un divisor de potencia 1x2 en ramificación "Y" de bajas pérdidas, compacto y poco sensible a variaciones en la longitud de onda [7]. Por lo tanto, haremos uso de este diseño debido a que se pueden generar un dispositivo más compacto y eficiente que los diseños con curvaturas radiales, senoidales o polinomiales.

7.2. Diseño de Divisores de potencia 1x2, 1x4 y 1x8 basados en SCC (*Coherence Coupling Theory*) y MMI (*Multi Mode Interfereance)* desarrollados en SOI y Si_3N_4.

En este sección, se presenta un nuevo diseño de un divisor de potencia (*splitter*) Y-branch que combina la teoría del acoplamiento coherente (SCC) para desviar la luz a la salida, con una estructura de interferencia multimodo (MMI) para dividir la luz en la entrada. El dispositivo presenta una alta eficiencia de transmisión y un tamaño muy reducido respecto de los *splitters* convencionales. El componente fotónico está diseñado para fabricarse con el moderno procesos CMOS, particularmente en las plataformas del silicio sobre aislante (SOI) y nitruro de silicio Si_3N_4. El diseño del divisor está respaldado por muchas simulaciones computacionales. A partir de estas simulaciones, se estudió la relación entre la potencia transmitida y los parámetros de diseño. Además, se estableció un parámetro de diseño libre, que se puede ajustar según la aplicación deseada y así lograr un dispositivo fotónico muy adaptable.

7.3. Diseño de divisores de potencia integrados en Si_3N_4

El dispositivo se basa en una oblea comercial de la firma Silicon Valley Microelectronics, con una película de nitruro de silicio LPCVD de 300 nm de espesor, sobre una capa de Dióxido de Silicio con un espesor de 3 μm sobre un sustrato de silicio. Para obtener una polarización monomodo de 1,55 μm, se utiliza una guía de onda tipo *strip* con un ancho de 1,5 μm. Con esta estructura en la geometría, la guía de onda solo admite el modo fundamental tipo TE. El diagrama de diseño de los divisores de potencia se presenta en la Figura 7.2. En esta imagen, se detallan las trayectorias de longitud óptica utilizadas para construir el dispositivo integrado basado en el acoplamiento coherente simplificado. Además, se utiliza una guía de ondas de interferencia multimodo (MMI) para dividir la luz entrante. Se

utilizan guías de ondas tipo *strip* de 1,5 μm de ancho para la entrada, las salidas y las curvas multisección. Como se puede ver en la Figura 7.2, los parámetros que se optimizaron siguiendo este enfoque son L_1, L_2 y θ.

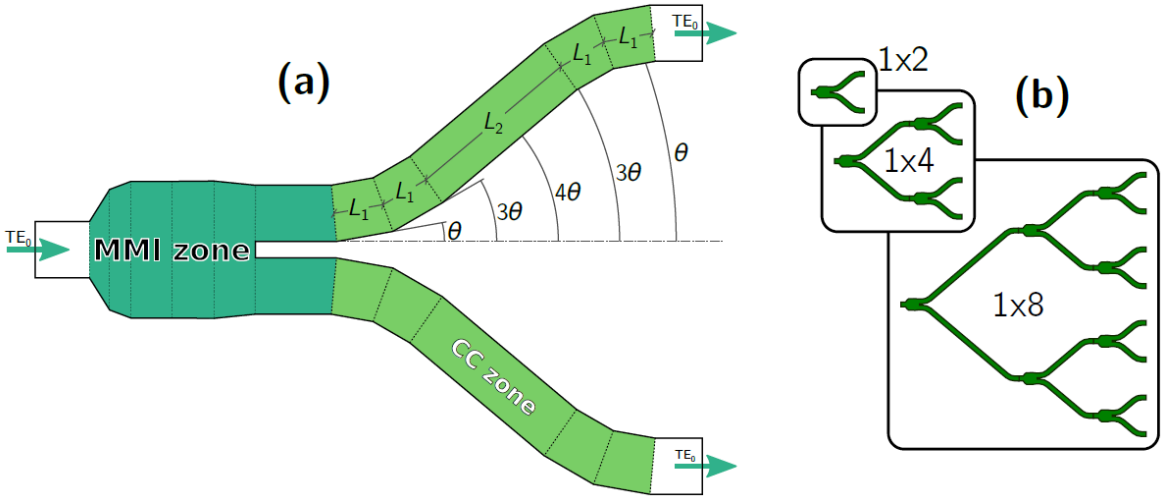


Figura 7.2: Esquemático del divisor de potencia Y-branch. (a): Diseño y parámetros a optimizar; y (b) 1x2, 1x4 y 1x8 Y-branch basados en acoplamiento coherente.

7.3.1. Optimización del diseño.

Bajo este esquema de diseño se puede lograr un *footprint* muy pequeño, ya que la curvatura efectiva del dispositivo propuesto es más abrupta que la de una guía de ondas de curvatura típica. En este sentido, desde la teoría del acoplamiento coherente, el parámetro más importante a determinar es la longitud L_1. Este parámetro definirá el comportamiento periódico de la estructura para la salida, por lo que se ha estudiado la relación de la transmisión de potencia versus la longitud del camino L_1. Las simulaciones se realizaron utilizando el método FDTD para la geometría denotada como CC zone [8] de la Figura 7.2. El análisis se realizó asumiendo $L_2 = L_1$ y $\theta = 12,5°$, se debe tener en cuenta que es útil escribir L_2 en términos de L_1, para poder iniciar el análisis.

Se realizó un barrido de la longitud L_1 y L_2 con λ=1.55 μm, ángulo $\theta = 12{,}5°$ y se estudió la transmisión en la zona de acoplamiento coherente.

En la Figura 7.3 se muestran los resultados obtenidos, se puede observar varios máximos de transmisión, el mayor pico ocurre cuando L_1 y L_2 son iguales a 3,87 μm. Como el objetivo principal de la fotónica integrada con es este tipo de estructura es lograr un dispositivo que ocupe el menor espacio, tomamos la longitud más corta en el primer período de transmisión. Además, los resultados indicaron que el camino L_1 es un parámetro estrictamente relacionado con el

acoplamiento coherente simplificado y, por lo tanto, se observó un comportamiento periódico de la transmisión, el primer máximo (3,87 μm) es menos sensible que el segundo (7,6 μm), por lo que es conveniente utilizar ese primer máximo para llegar a un diseño robusto.

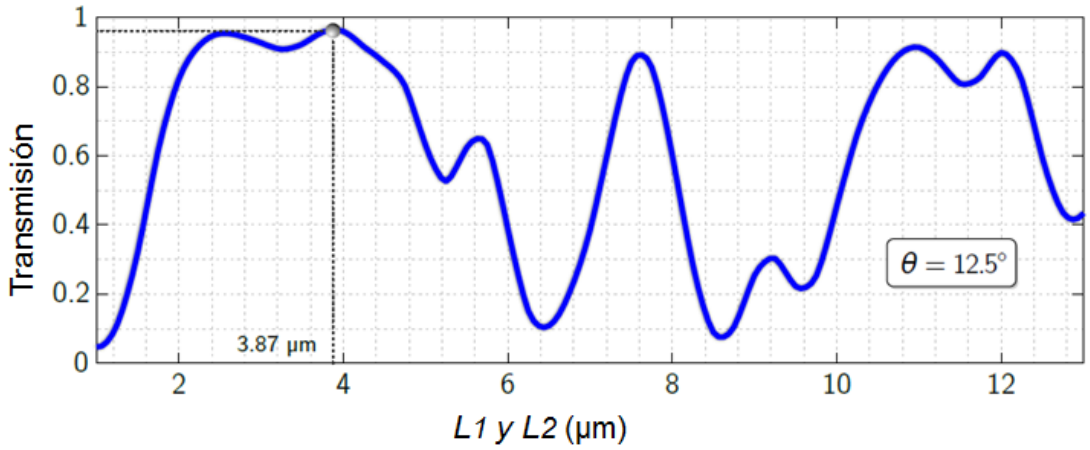


Figura 7.3: Transmisión en la zona de acoplamiento coherente a $\lambda = 1,55\mu m$. Barrido en la longitud L1 y L2 con $\theta = 12{,}5°$ en Nitruro de Silicio

Para estudiar la sensibilidad de los parámetros previamente fijados, se exploró el cambio en la transmisión con respecto a las variaciones L_2 y θ. Para hacerlo, se realizaron dos simulaciones, una para estudiar la transmisión barriendo simultáneamente L_1 y θ, cuando L_2 es igual a L_1.

Así mismo, estudiamos la transmisión de potencia en función de L_1 y L_2 considerando θ igual a 12.5°. Este análisis nos permitió entender que el diseño es claramente más sensible a la fluctuación del ángulo θ que a la trayectoria longitudinal L_2. Por lo tanto, la energía transportada por modos no guiados crece para ángulos grandes. Como consecuencia, sólo una pequeña parte de la energía se vuelve a acoplar a las guías de onda, mientras que el resto se pierde en forma de energía irradiada hacia el *cladding* [3] [9].

Finalmente, L_2 será un parámetro libre para ajustar convenientemente. Este parámetro se puede seleccionar para reducir el exceso de pérdida o para mejorar la respuesta de la longitud de onda, así como para personalizar el espacio entre ramas como se describe en la Figura 7.2.

Por otro lado, para la entrada del dispositivo, se propuso una guía de onda con interferencia multimodal para dividir la luz en dos ramas. El esquema de la zona MMI se muestra en la Figura 7.2(a). Este, se basa en el efecto de autoimagen, y es un componente ampliamente utilizado en la fotónica integrada, ya que permite dividir y combinar de distintas maneras los modos [10]. Aunque la estructura

clave de un dispositivo MMI es una guía de ondas diseñada para admitir una gran cantidad de modos, utilizamos una estructura lo suficientemente pequeña que admite solo unos pocos modos confinados. Desde una perspectiva constructiva, es conveniente utilizar una guía de onda de interferencia multimodo con un ancho pequeño. Por lo tanto, consideramos el diseño conocido descrito en [11]. El tamaño final del dispositivo y las pérdidas, seguirán siendo muy pequeñas si utilizamos esta estructura multimodo.

Siguiendo el planteamiento adoptado, toda la sección de la zona MMI se divide en cinco tramos y diferentes anchos para cada uno, como se muestra en la Figura 7.2(a). En concreto, se dividió en cuatro partes iguales, mientras que la primera de ellas se dividió en dos, dando como resultado un total de cinco secciones. La distancia entre las guías de onda de salida se fijó en 600 nm, por lo que el último ancho es igual a 3,6 μm. Llamamos L_M a la longitud total de la región del interferómetro y W_{1-5} a los anchos respectivos. Además, se utiliza una sección recta L_3 para estabilizar el modo fundamental TE en la entrada de la región de acoplamiento coherente. Los parámetros de diseño óptimos que minimizan las pérdidas se han encontrado utilizando FDTD (sección 3.2.3) y propagador de modos (EME, sección 3.2.3). Las simulaciones se realizaron midiendo las salidas del divisor de potencia y barriendo los parámetros L_M, L_3 y W_{1-4}. En la Figura 7.4 se muestra la distribución de intensidad del campo eléctrico del diseño optimizado a λ =1.55μm.

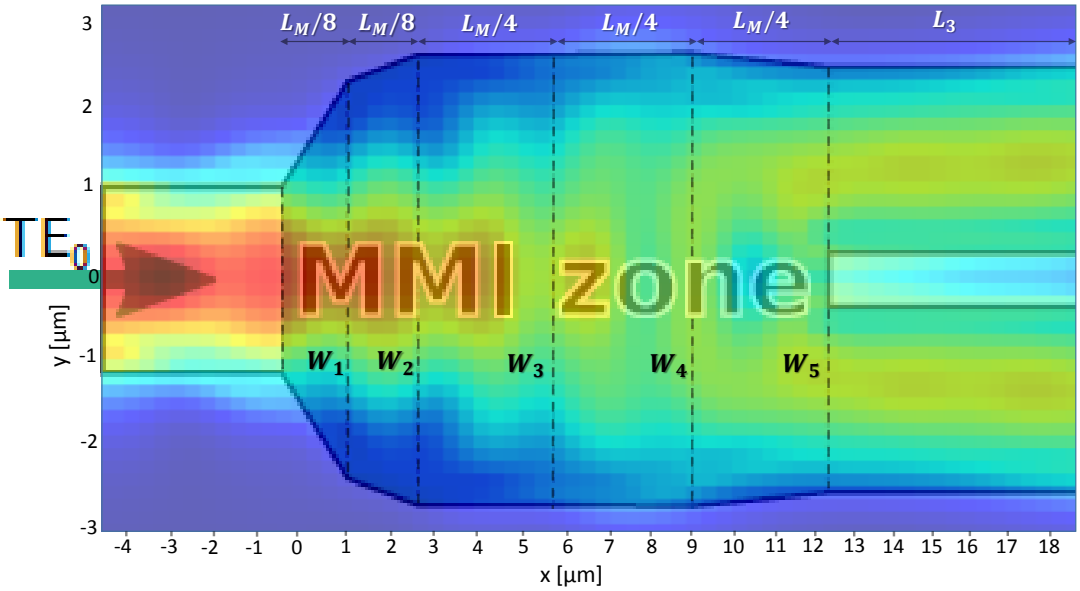


Figura 7.4: Distribución de intensidad del campo eléctrico del diseño final, optimizado a $\lambda = 1,55\mu$m en Nitruro de Silicio

Tabla 7.1: Valores de los parámetros optimizados en el diseño.

Zona CC			Zona MMI						
θ	L_1	L_2	L_3	L_M	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
12.5°	3.87 μm	libre	4.73 μm	10.4 μm	3.66 μm	4.38 μm	4.54 μm	4.13 μm	3.6 μm

Todos los parámetros de diseño optimizados se enumeran en la Tabla 7.1. Consideramos la relación de transmisión Y-branch con respecto a la longitud de onda y L_2. De los resultados obtenidos, se observó que debido al desajuste de fases en curvaturas multiseccionales de acoplamiento coherente debido a cambios en la longitud L_2, el dispositivo presenta máximos y mínimos en la transmisión. Estas variaciones se encuentran entre -3,15 dB y -3,38 dB, lo que significa que las pérdidas para diferentes valores del parámetros libre L_2 no son significativas. En particular, se procedió a estudiar un divisor de potencia Y-branch, el mismo cuenta con un espacio libre entre las ramas de 16 μm para comparar el rendimiento y el tamaño de nuestro dispositivo. Según los parámetros de diseño optimizados, la longitud libre L_2 se fija en 0,72 μm. El rendimiento del dispositivo se analizó mediante simulaciones 3D FDTD. Se pudo observar que la energía electromagnética está adecuadamente acoplada a las ramas de salida. Además, se debe tener en cuenta que las múltiples reflexiones en la zona de acoplamiento coherente se volvieron a acoplar correctamente.

Por otro lado, con el diseño propuesto y optimizado se puede lograr un divisor de potencia ultracompacto de 1x2N, para ello basta con utilizar N divisores de potencia 1X2 con diferentes segmentos L_2 cada uno. Esta idea se muestra en la Figura 7.2(b). Por ejemplo, el *footprint* de un divisor de 1x2 Y-branch basado en s-bend puede tener un área de $16x200\mu m^2$, mientras que el *footprint* de un dispositivo basado en acoplamiento coherente permanece en $16x30\mu m^2$. Finalmente, la característica más importante de este diseño es su tamaño muy reducido, debido a que el ángulo efectivo es muy agudo gracias al acoplamiento coherente incorporado, haciéndolo más compacto cuando se necesite espacio entre las ramas.

En resumen, se propuso y demostró un divisor de potencia de Y-branch ultracompacto con la plataforma del Si_3N_4, muy adaptable y altamente eficiente. Se combinaron dos técnicas para eso, el acoplamiento coherente simplificado (SCC) y la estructura de interferencia multimodo (MMI) para dividir la luz. Los parámetros de diseño se optimizaron para maximizar la transmisión. Además, se proporciona un parámetro de diseño libre que se puede ajustar según la aplicación. Finalmente, el diseño resultó ser casi 6,5 veces más pequeño que otro dispositivo divisor de potencia estándar y con un comportamiento similar (Fig.7.5).

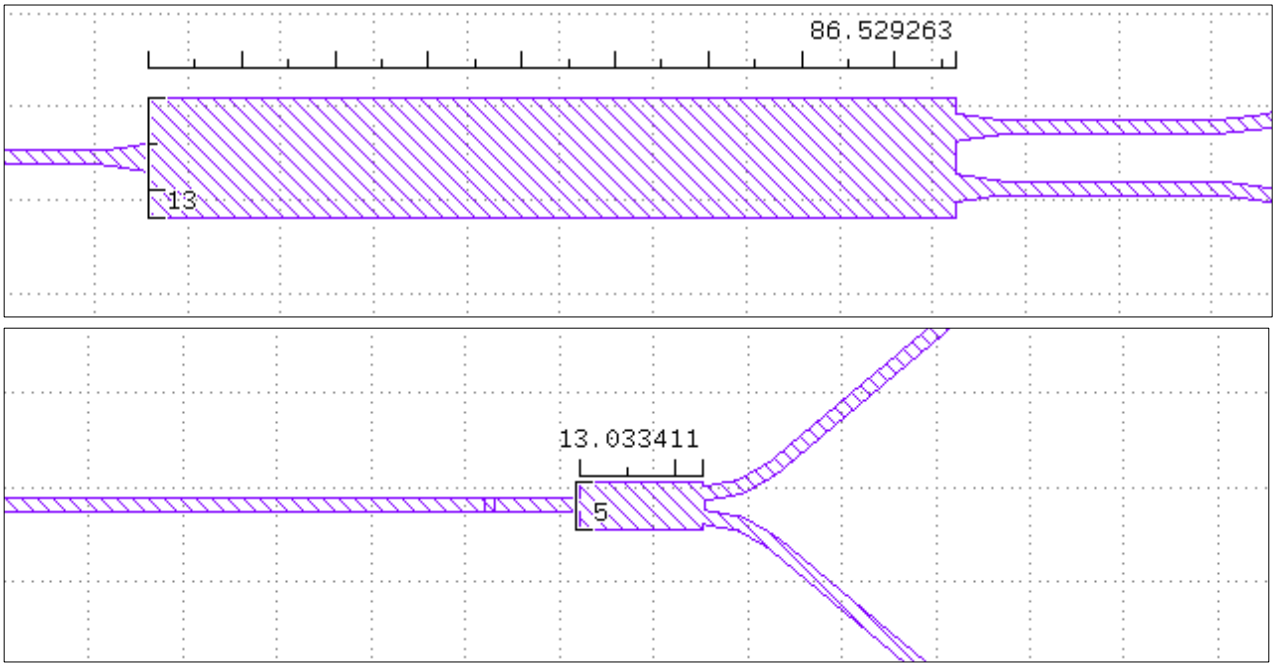


Figura 7.5: Arriba: área del divisor de potencia 1x2 MMI estándar en Si_3N_4. Abajo: área del divisor de potencia 1x2 SSC+MMI propuesto en Si_3N_4.

7.3.2. *Layout* y fabricación

Una vez que se estudio la física del dispositivo y luego de haber optimizado la *performance* del mismo, el siguiente paso es realizar el *layout* de los divisores de potencia propuestos, los mismos fueron impresos mediante escritura UV en la fotomáscara descrita en la sección 6.2. Luego fueron fabricados con procesos litográficos de tecnología CMOS, procesos que fueron desarrollados y descritos en la sección 6.3

El primer paso fue diseñar en LibreCAD un divisor de potencia 1x2 SCC+MMI personalizado (Fig. 7.6a arriba), luego se lo guardo como un bloque en formato GDSII. Utilizando python, se importo el bloque en la librería gdspy (ver sección 6.2.1), la fuerza y rapidez de este enfoque al usar *scritps* automatizados, permitió generar de manera escalada y redundante divisores de potencia SCC+MMI 1x2, 1x4 y 1x8 (Fig. 7.6), obteniendo como resultado final, muestras que forman parte del *layout* de la fotomáscara fabricada en la figura 6.6.

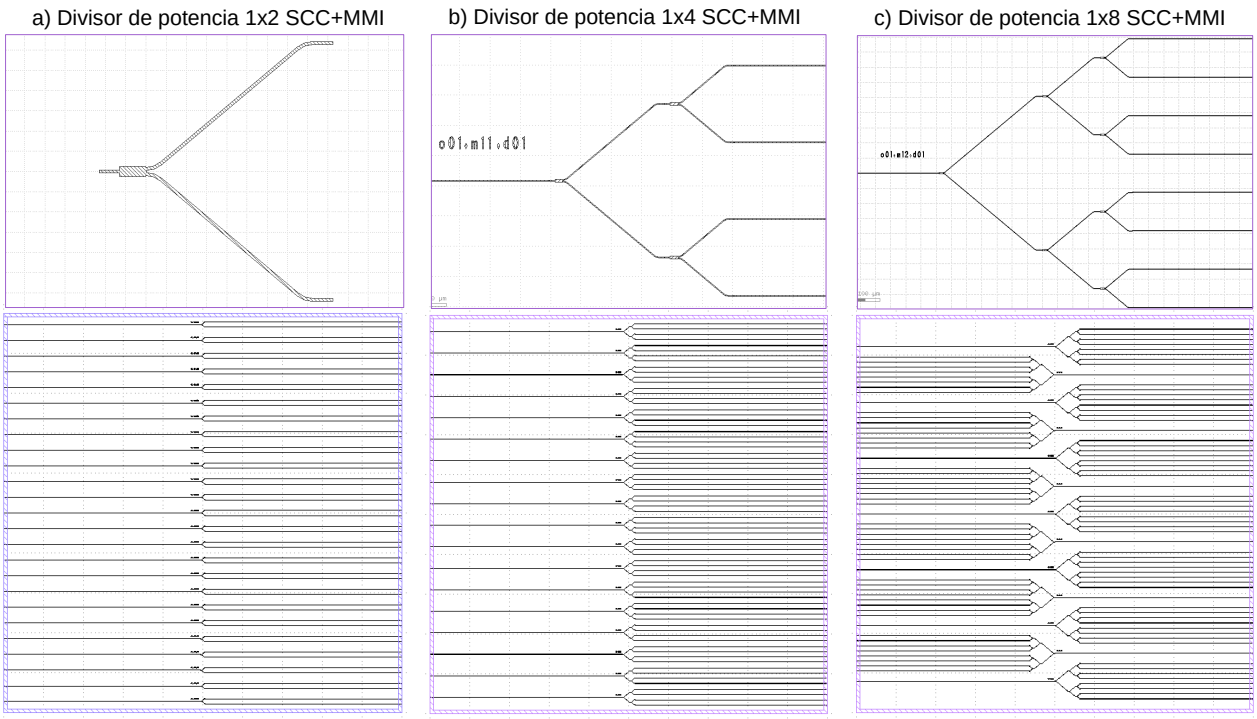


Figura 7.6: a) Arriba: *Layout* de un divisor 1x2 SCC+MMI. Abajo: *Layout* de una muestra con varios divisores 1x2. b) Arriba: *Layout* de un divisor 1x4 SCC+MMI. Abajo: *Layout* de una muestra con varios divisores 1x4. c) Arriba: *Layout* de un divisor 1x8 SCC+MMI. Abajo: *Layout* de una muestra con varios divisores 1x8.

Los divisores de potencia fueron diseñados para ser acoplados por el canto (*edge coupler*), técnica que fue descrita en la sección 5.4. Las zonas denotados con color magenta (Fig. 7.6, abajo), indican la zona de corte y pulido. El corte de las muestras fue realizado mediante una cortadora de obleas, pero también se realizaron clivados con punta de diamante. El pulido se realizó manualmente mediante pastas de diamantadas.

El motivo por el cual se añadieron varios divisores de potencia en una sola muestra, es por la posibilidad de que muchos de estos se dañen durante la microfabricación. Mantener un control estricto de los parámetros ambientales en las salas limpias no es sencillo. A pesar de haber caracterizado y creado recetas para cada proceso, pueden surgir variaciones indeseadas en alguno de los procesos como en el revelado, transferencia UV y ataques RIE debido a cambios en la humedad, temperatura y cantidad de partículas en la sala limpia. Por todo lo mencionado, es una buena práctica implementar redundancia de dispositivos durante la fabricación.

Por otro lado, estos divisores de potencia también fueron diseñados y escalados para ser acoplados mediante *grating couplers* (acoplamiento vertical) como se

muestra en la Figura 7.7(a).

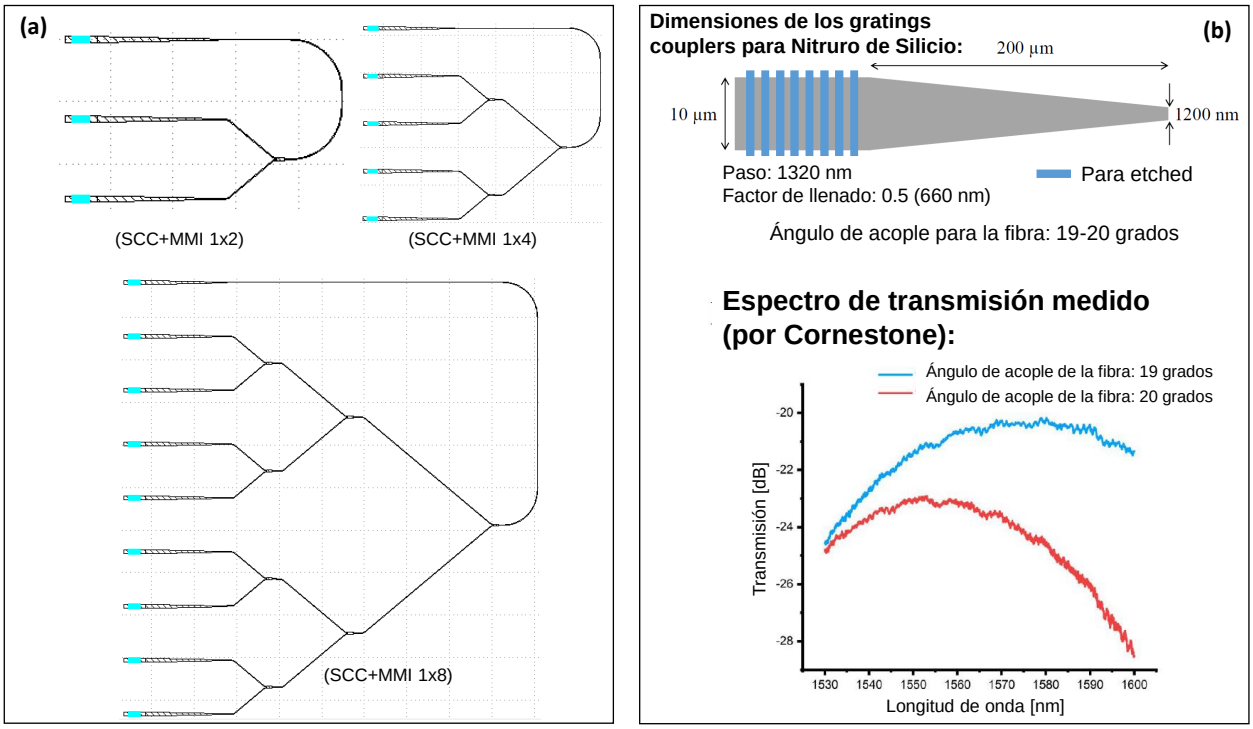


Figura 7.7: a) *Layout* de los divisores de potencia SCC+MMI 1x2, 1x4 y 1x8 con grating couplers b) Dimensiones y respuesta espectral del *grating couplers* en nitruro de silicio, desarrollados por Conerstone.

La resolución espacial de las redes de los *grating couplers* es de 660 nm (para λ_c=1550 nm). Sin embargo, el límite de resolución litográfica alcanzado con los equipos comerciales en la sala limpia de CNEA es de 1 μm. Por este motivo, se decidió no usar este enfoque de acople para la plataforma del nitruro de silicio. En su lugar, los *grating couplers* de estas dimensiones han sido desarrollados por la foundrie CORNESTONE y pueden ser fabricados mediante un *Multi Project Wafer* (MPW) de la misma. En la sección 7.4.5, se detallará la técnica de acople óptico utilizando *grating couplers* en la plataforma SOI.

Para la fabricación, se utilizaron las obleas detalladas en la sección 7.3 y las dimensiones de las guías de onda monomodo se pueden observar en la Figura 7.8.

Finalmente, en la figura 7.9 se muestran los resultados de la fabricación de los de los divisores de potencia integrados, a partir del acoplamiento coherente simplificado e interferencia multimodal.

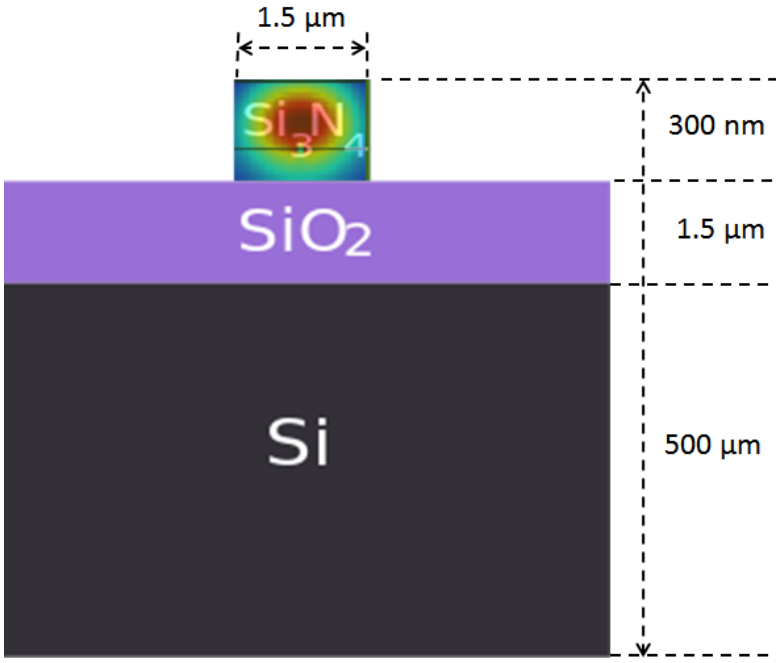


Figura 7.8: Dimensiones de las guías de onda tipo *strip* fabricadas en nitruro de silicio.

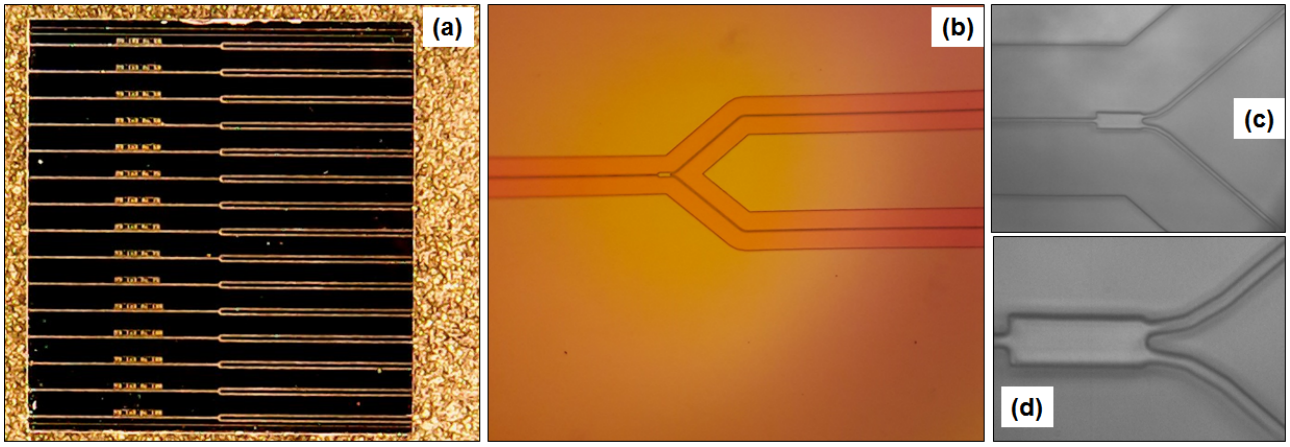


Figura 7.9: Divisores de potencias fabricados con tecnología CMOS en la plataforma del nitruro de silicio. a) Imagen de un chip con los divisores. b) Imagen 10x capturada con microscopio. c) Imagen 20x capturada con microscopio. Imagen 50x capturada con microscopio

En futuros trabajos se realizará la caracterización y análisis de espectral para este tipo de dispositivos, mediante la plataforma tecnológica del nitruro de silicio.

7.4. Diseño, fabricación, pruebas y empaquetado del divisor de potencia desarrollado bajo la plataforma SOI.

En esta sección presentamos una breve descripción del diseño y fabricación un divisores de potencia 1x4 y 1x8 desarrollados bajo la plataforma de silicio sobre aislante (SOI). Los dispositivos propuestos pueden ser introducido comercialmente en las actuales redes ópticas pasivas (PON) recientemente implementadas en el país o a ser instaladas en la arquitectura de fibra al hogar (FTTH) que se está desarrollado agresivamente en las ciudades modernas atendiendo a la alta demanda de tráfico de datos para los servicios de *streaming*, telecomunicaciones, etc. dentro de la interconexión global de Internet.

Para describir todo el proceso tecnológico que conlleva la fabricación del dispositivo divisor de potencia, seguimos los siguientes pasos: en primer lugar, comenzamos a diseñar y validar nuestro circuito fotónico propuesto mediante cálculo utilizando varias rutinas computacionales respaldadas por métodos numéricos populares como FDTD, EME y MODE, embebidos en la suite de distintos softwares comerciales del tipo Lumerical, R-Soft. En un segundo paso, describiremos todo lo que necesitamos saber sobre los procesos y demás detalles de la plataforma tecnológica para fabricar nuestro circuito diseñado. Finalmente, el objetivo de la sección de esta escritura, es presentar y describir cuidadosamente el proceso de empaquetado, que implica la pre-alineación y el acoplamiento de la señal óptica al chip, como así también la integración de todos los componentes. Además, diseñamos el *hausing* del sistema teniendo en cuenta los componentes internos y externos del dispositivo final, donde se han incluido las interfaces de I/O compatibles con fibra óptica SM. Para el último paso, todos los componentes y la carcasa se fabricaron mediante impresión 3D.

7.4.1. La industria fotónica exige procesos fáciles y fiables.

El principal inconveniente de la integración óptica en la fotónica de silicio reside en la manipulación de diferentes piezas menores a 1 μm, por lo que este requisito podría ser cubierto completamente, introduciendo una forma robusta y automática de integrar las entradas/salidas de nuestros sistemas fotónicos fabricados bajo la plataforma del silicio. Sin embargo, un punto clave para superar los criterios de fabricación mencionados anteriormente y desarrollar estos diseños innovadores, es cómo poder llevar a cabo una estrategia adecuada y sólida para integrar y llevar a cabo, un empaquetado adecuado para estos nuevos dispositivo. En particular,

no existen estándares a seguir, por lo que este aspecto es un tema importante que deberá resolverse a la brevedad. Para obtener una conexión óptica adecuada normalmente necesitamos cubrir tolerancias estrictas de alineación o compatibilidad con el montaje estándar de sistemas eléctricos. Además, las interfaces ópticas son muy sensibles a las pérdidas y también a las longitudes de onda utilizadas [12] [13].

Por un lado, las integraciones ópticas exigen una resolución mínima para unir el chip y otros componentes ópticos, como los conjuntos de fibras (*fiber array*). Se utilizan comúnmente nuevos adhesivos epoxi UV con soluciones de buen rendimiento, y que se lograron obteniendo compatibilidad aeroespacial. Por otro lado, las interfaces adecuadas también son un requisito importante, por lo que la fusión de fibra bien establecida al conector de entrada y salida es una tarea cuidadosa. Se exigen conectores de fibra rápidos y sencillos para que las redes públicas FTTH como SC-APC o PUC sigan los estándares de comunicaciones ópticas.

Para cumplir con los requisitos anteriores, no existe una ruta adecuada a seguir en el empaquetado de la fotónica integrada. Los laboratorios, grupos de investigación y empresas que realizan estas actividades siguen sus estrategias y pasos caseros adecuados para cada dispositivo fotónico en particular. Así cada uno de ellos define sus reglas de procedimiento según el desafío a superar [14][15]. Además, para llevar a cabo las interconexiones ópticas pasivas, la integración de fuentes láser y componentes ópticos (micro-lentes o espejos) es un punto clave, la ingeniería debe considerar las interfaces ópticas, los problemas térmicos y la compatibilidad del proceso de rutina para el embalaje (prototipado).

En los últimos años ha emergido una potente herramienta para incorporar procedimientos sencillos y de bajo costo para la creación de prototipos de fotónica integrada. Esta tendencia se está volviendo popular y puede ser accesible en pequeños laboratorios, o incluso con fines didácticos en los niveles de pre-grado, grado y educación superior. En este sentido, el uso de la impresión 3D es un recurso comúnmente adecuado que impacta en varias áreas del desarrollo, ya que da lugar a la creación rápida de prototipos para ser probados en laboratorio [16] [12] [13].

Además, siguiendo la estrategia anterior, gestionar procedimientos cuidadosos para la fotónica integrada puede representar una pieza valiosa para la comunidad óptica y tecnológica. La comunidad fotónica del silicio, exige y desea encarecidamente una descripción profunda de cada paso sucesivo para este propósito.

Por todas las razones anteriores, en esta sección se pretende brindar a los lec-

tores, una ruta para entregar un proceso de fabricación detallado correspondiente a un divisor de potencia, diseñado para trabajar en la banda de comunicaciones ópticas. Este esquema incluye el diseño y simulación para soportar el desempeño óptico en la plataforma SOI. Además, se presentarán las etapas de integración y empaquetado, así como los principales aportes del manuscrito actual donde también se considera la impresión 3D para el caso del divisor óptico.

7.4.2. Diseño de divisores de potencia integrados en SOI

El diseño del divisor de potencia propuesto en la plataforma SOI, consta de un núcleo de silicio cristalino de 340 nm de espesor, sobre una capa de dióxido de silicio enterrada con un espesor de 2 μm, sobre un sustrato de silicio, además de una deposición de dióxido de silicio de 1 μm como revestimiento o *cladding* (Figura 7.10). Las guías de onda son del tipo *strip*, y el ancho estándar para guías monomodo a λ_c=1.55 μm es de 450 nm, el índice efectivo n_{eff} =2.662 para el modo fundamental TE. Para validar el diseño óptico se realizaron simulaciones computacionales. Las mismas fueron realizadas mediante el método 3D de dominio de tiempo de diferencias finitas (3D-FDTD) [17] [18].



Figura 7.10: Estructura de las guías onda *strip*, utilizadas para los divisores de potencia con la plataforma SOI.

Siguiendo la misma metodología y optimización de los divisores de potencia desarrollados en nitruro de silicio (sección 7.3.1), se adaptó el diseño del divisor propuesto para la plataforma SOI.

Se ingresa en la entrada del dispositivo, una guía de onda de interferencia multimodal (MMI) para dividir la luz en dos ramas. Como se vio en secciones anteriores, un MMI esta basado en el efecto de autoimagen, que puede realizar muchas funciones diferentes de división y combinación [19] [20]. Aunque la estructura clave de un dispositivo MMI es una guía de onda diseñada para admitir una gran cantidad de modos, para la plataforma SOI también utilizamos una estructura lo suficientemente pequeña que admite solo dos modos. Como la longitud característica de autoimagen L_{MMI} tiene una dependencia cuadrática con el ancho W_{MMI}, el área final seguirá siendo muy pequeña si usamos ese tamaño de estructura multimodo [21]. Motivo por el cual, se eligió un $W_{MMI} = 0{,}9$ μm para el dispositivo (Fig. 7.11).

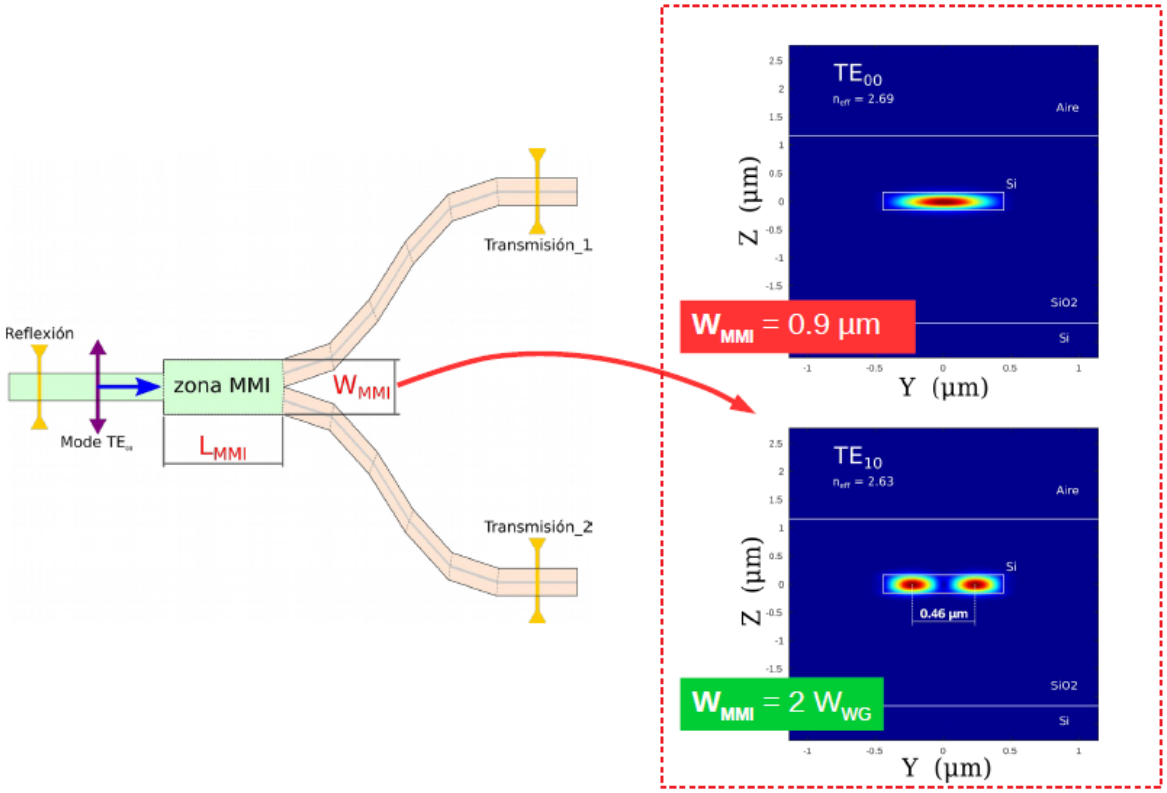


Figura 7.11: Elección del parámetro W_{MMI}.

Inicialmente se simuló la propagación de la luz considerando una estructura MMI de longitud infinita. El campo eléctrico de entrada se reproduce en una longitud específica con un ligero retardo de fase, y los modos en esta región MMI se vuelven modos simétricos.

Una vez estudiada la propagación, se procedió a definir la longitud óptima en la que se reproducen dos imágenes del monomodo entrante. Las simulaciones se

realizaron estableciendo el parámetro libre L_2 en 0,4 μm y barriendo la longitud del L_{MMI}, donde la transmisión de potencia en las ramas es función de la longitud de la interferencia multimodal. La mejor condición de división se encontró en L_{MMI} =0.415 μm.

Con todos los parámetros de diseño optimizados se procede a estudiar la relación entre la potencia transmitida y la longitud del camino L_2. Los resultados obtenidos indicaron que el dispositivo presenta una transmisión periódica que está entre -3.05dB y -3.15dB, porque prevalece el efecto de acoplamiento coherente.

Finalmente, la característica más importante de este diseño implementado en SOI es su tamaño muy reducido; por ejemplo, el tamaño de un MMI 1x2 estándar con comportamiento similar es de 6x34 μm^2, mientras que el tamaño de un divisor de potencia 1x2 basado en en acoplamiento coherente es de unos 5x4 μm^2 (Fig. 7.12).

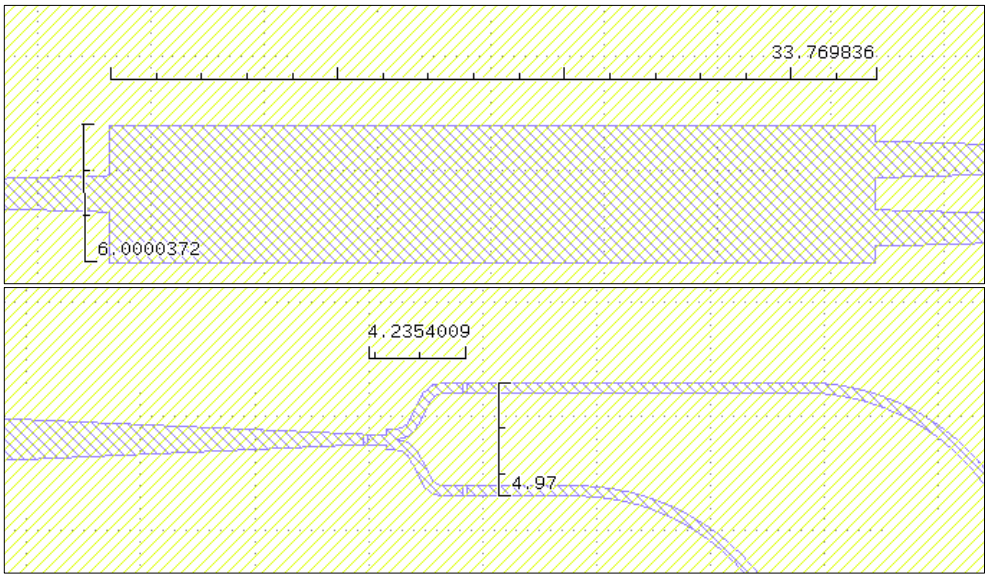


Figura 7.12: Arriba: Área del divisor de potencia 1x2 MMI estándar en SOI. Abajo: Área del divisor de potencia 1x2 SCC+MMI propuesto en SOI.

En resumen, se propuso y demostró un divisor de potencia de rama en Y ultracompacto, muy adaptable y altamente eficiente en la la tecnología del silicio sobre aislante (SOI). Al igual que en la plataforma Si_3N_4, se combinaron dos técnicas: el acoplamiento coherente simplificado y la estructura de interferencia multimodo para doblar y dividir la luz, respectivamente. Los parámetros de diseño se optimizaron para reducir el área y maximizar la transmisión óptica. Se consiguió una potencia de transmisión entre -3,05dB y -3,15dB, que va a depender del parámetro libre de diseño L_2. Finalmente, el diseño demostró ser casi nueve veces más pequeño que otro dispositivo de uso común y con un comportamiento similar.

7.4.3. Layout del chip fotónico.

En la Figura 7.13(a) presentamos el diseño cad (GDS) realizado para la fabricación del chip fotónico (fabricado en Cornestone), que incluye varios diseños de fotónica y distintos tipos de divisores de potencia analizados en este trabajo. En particular, el diseño propuesto SSC+MMI en varias versiones, 1x2, 1x4 y 1x8. Como se puede ver en esta imagen, cada dispositivo está entre un circuito óptico de referencia, es decir, un circuito acoplador entrada/salida 1x1. Los circuitos 1x1 diseño se utiliza para probar las pérdidas de acoplamiento del chip, y se puede utilizar para desacoplar este valor de las mediciones experimentales tomadas de los divisores.

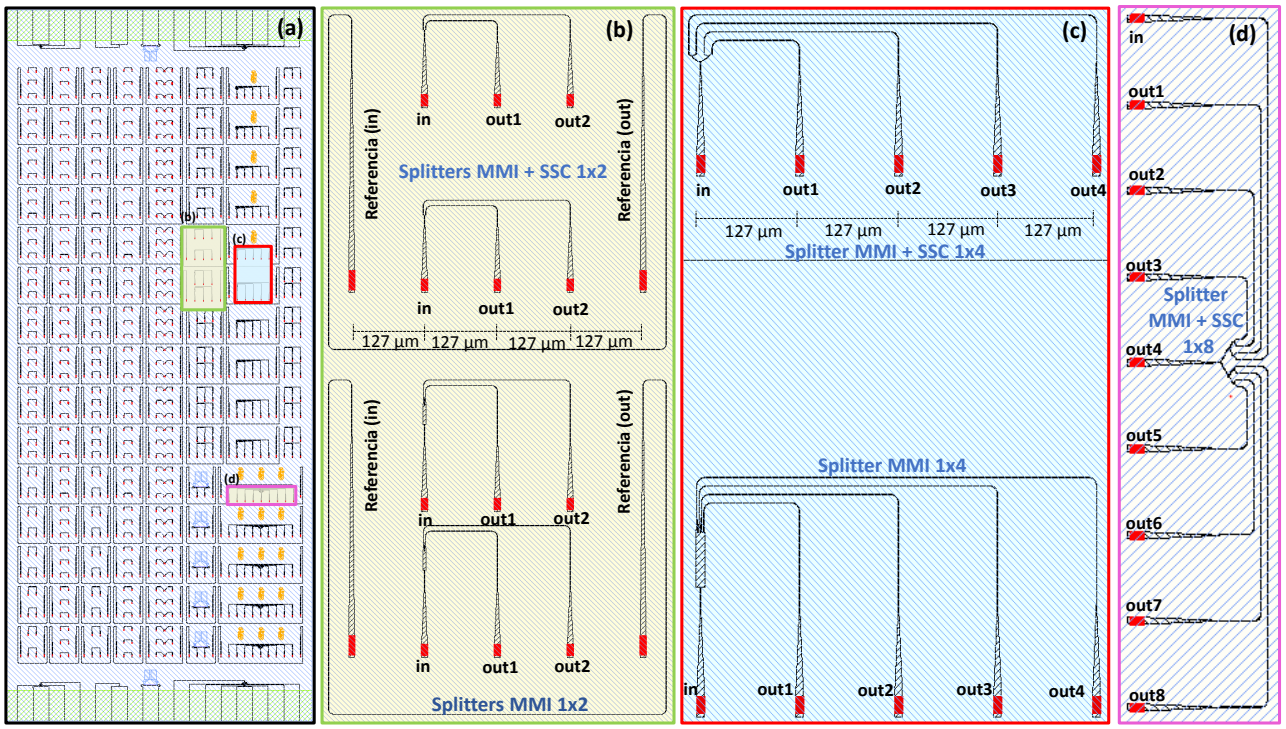


Figura 7.13: (a) Diseño correspondiente al chip fotónico utilizado en este trabajo. Esto incluye los divisores de potencia 1x2, 1x4 y 1x8 diseñados y medidos en nuestro chip fotónico. La Figura (b) muestra detalles del diseño del divisor SCC+MMI 1x2 y de un divisor MMI 1x2 convencional. La Figura (c) presenta el diseño de un divisor SCC+MMI 1x4 y de un divisor MMI 1x4 estándar, finalmente, en la Figura (d) se presenta el diseño de un divisor SCC+MMI 1x8.

La distancia entre cada uno de los acopladores es de 127 μm, por lo que se utilizó esta distancia para todos los demás dispositivos fabricados. Esta distancia corresponde a una separación estándar de conjuntos de fibras ópticas para acoplar y desacoplar la luz de cada dispositivo fotónico. Como se puede observar en esta parte del chip fotónico se ingresaron muchos circuitos fotónicos, y nos enfocamos

en al divisor de potencia basado en el diseño SCC y MMI desarrollado en este trabajo.

En la Figura 7.12 (abajo) se presenta el diseño del divisor 1x2 propuesto. En esta imagen se puede apreciar la arquitectura del divisor SCC mencionada, se puede observar un pequeño MMI en la entrada para dividir los modos de propagación y luego podemos ver las dos ramas de alta deflexión que se diseñaron siguiendo la teoría de acoplamiento coherente simplificado (SCC), para cada una de las ramas de salida que luego se conducen hasta los *grating couplers* de salida. Además, en la parte superior de la Figura 7.13 (b) se puede observar como se dispone este mismo divisor en el chip y se detalla el circuito óptico 1x1 para acoplar señales de entrada/salida en el chip, el cual se utilizó como referencia de señal de potencia para desacoplar las pérdidas ópticas al realizar el procedimiento de acoplamiento óptico con *grating couplers* al chip.

Finalmente, en la Figura 7.12 (arriba) se muestra un divisor de potencia estándar 1x2 basado en interferencia multimodo (MMI) y en la parte inferior de la Figura 7.13 (b) se puede observar como se dispone este divisor en el chip. Principalmente, la idea de incluir este dispositivo es realizar una caracterización comparativa del rendimiento de propagación con nuestro diseño (lo veremos en detalle en la sección 7.4.7). El diseño actual del MMI lo proporciona el propio fabricante bajo un diseño estándar y suele utilizarse para crear circuitos fotónicos más complejos. En este sentido, compararemos el rendimiento de los dos tipos de divisores de potencia 1x4 y 1x8 bajo experimentos de acoplamiento realizados en la banda de comunicación C. En la Figura 7.12 se pudo observar que el tamaño de nuestro diseño es significativamente menor que el del dispositivo MMI estándar proporcionado por el fabricante.

7.4.4. Fabricación de divisores de potencia integrados en SOI.

Los procesos de fabricación de chips en SOI, en gran parte han seguido la litografía UV estándar desarrollada en la sección 6 y métodos asociados que se describen en [22]. Las dimensiones de las guías de onda son las que presentaron en la Figura 7.10. Los chips se diseñaron con un área rectangular, de aproximadamente 15 mm x 20 mm por cada lado.

Cada diseño tiene asociado un *grating coupler* para realizar el acoplamiento láser de Entrada/Salida. Para explorar los divisores de potencia, se utilizó un láser sintonizable, con un paso de 50 GHz en la banda de comunicaciones (1530-1560 nm) de Shenzhen Box Optronics Technology (China). Inicialmente, para garanti-

zar la reproducibilidad de la inspección se utilizó una plataforma motorizada de 6 ejes, el chip fotónico se fijó mediante adhesivo a un portaobjetos de microscópico. En la Figura 7.14(a) se presenta el diseño del divisor de potencia 1x2 descrito en la sección 7.4.2, y sus salidas conectadas con sus respectivos *grating couplers*. Para medir la potencia óptica a la salida, hemos utilizado dos sistemas en función de la sensibilidad requerida, se trata de un cabezal InGas acoplado a un amplificador de transimpedancia y conectado a una PC mediante una tarjeta LabJack T4. Además, para una mayor sensibilidad, utilizamos un medidor de potencia con una cabeza de Germanio (PM101U - Power Meter Interface de Thorlabs Inc. (EE. UU.). En la misma Figura 7.14(b) se puede apreciar el esquema correspondiente al divisor 1x8 y su imagen microscópica.

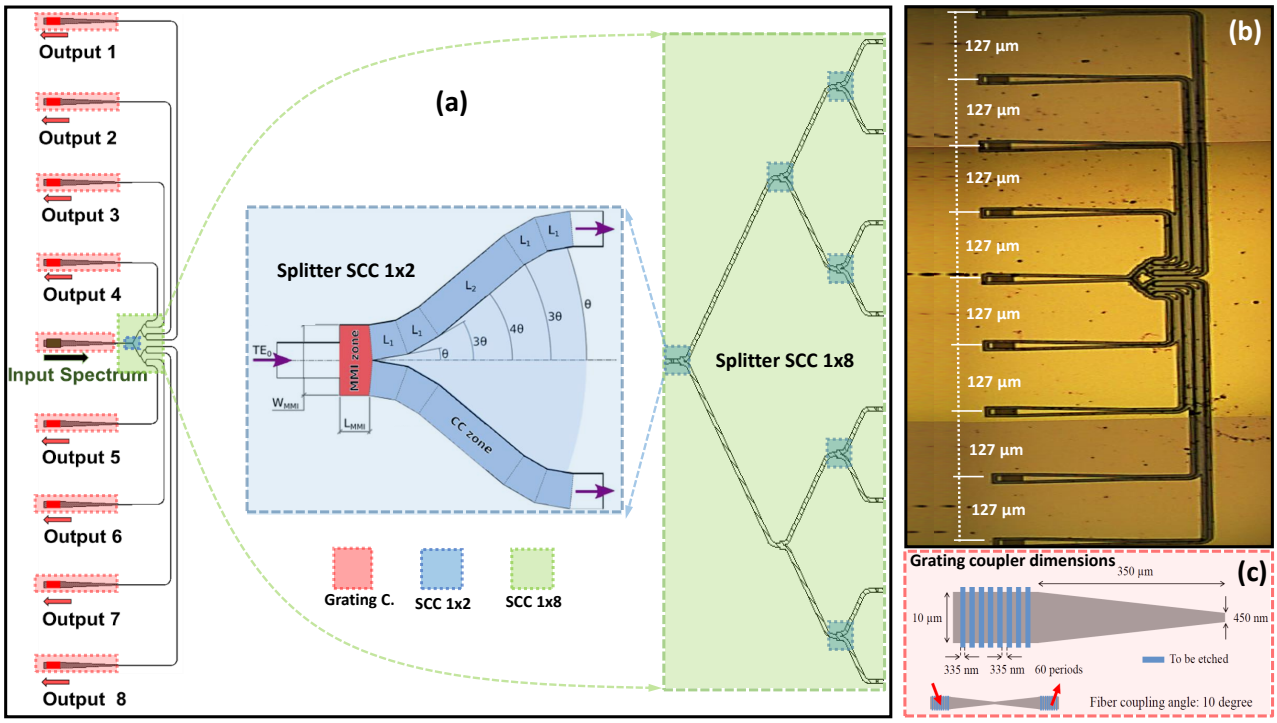


Figura 7.14: (a) Diseño del divisor de potencia SCC+MMI 1x8 con sus respectivos *grating couplers*. En el medio, se detalla el esquema para un divisor 1×2, que forma la base del dispositivo, se detalla en [22]. Como se observa, un pequeño MMI en la entrada, junto con las ramas de salida diseñadas utilizando la estrategia SCC, sustenta el diseño de nuestro divisor (resaltado en verde, a la derecha). (b) Se muestra una imagen de microscopio óptico del diseño 1×8, tomada del chip fotónico SOI. (c) Se muestra el diseño de los *grating couplers*.

7.4.5. Sistema de acople óptico

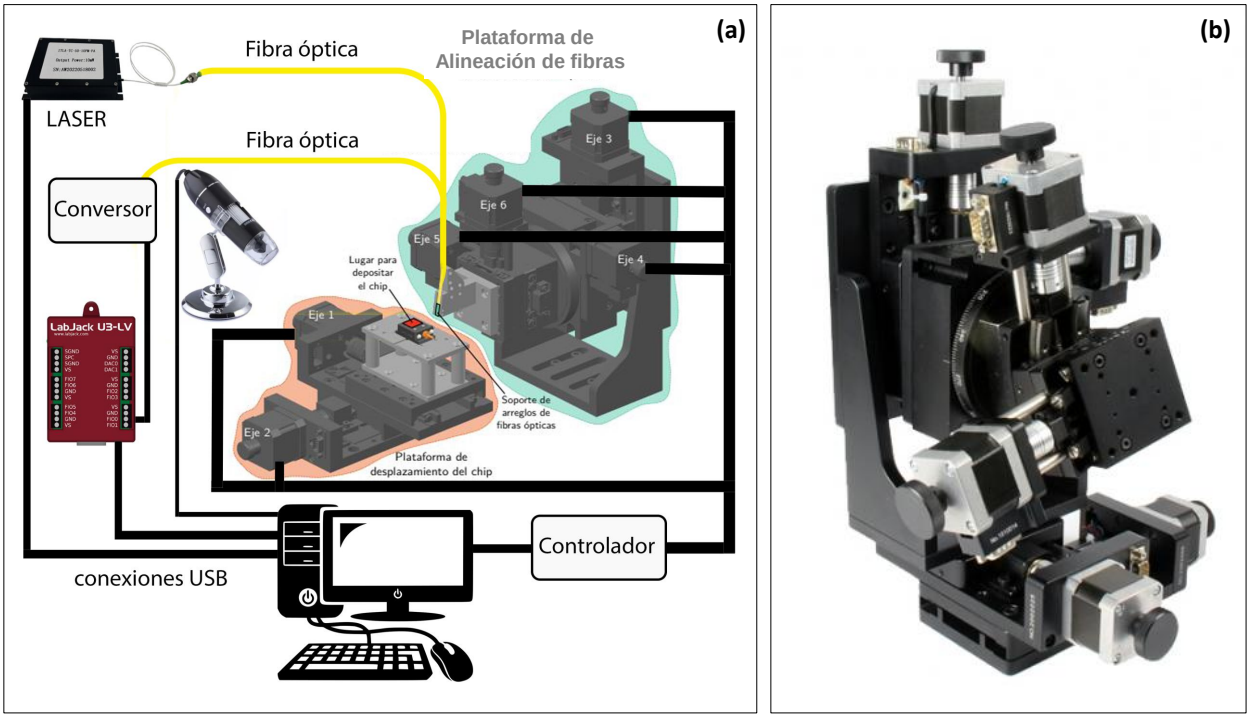


Figura 7.15: (a) Diagrama esquemático de la plataforma y periféricos para acople vertical mediante *grating couplers*. (b) Plataforma motorizada MOA-100 de 6 ejes

El propósito de este sistema es proporcionar una herramienta semi-automática para caracterizar chips fotónicos de la tecnología del silicio interconectados mediante arreglos de fibras ópticas y *grating couplers*. Para acoplar la luz al divisor de potencia utilizamos una estación motorizada de 6 ejes con resolución submicrométrica. En una primera etapa se diseñó la mejor combinación de los ejes adquiridos, con el fin de obtener un sistema versátil, preciso y óptimo para el tipo de movimientos requeridos. Para ello se decidió configurar y trabajar con una estación que se encuentra integrada por dos plataformas principales. La primera plataforma (X-Y) donde se ingresa el chip fotónico y queda paralelo a la mesa óptica. La segunda plataforma contiene las fibras ópticas que pueden alinearse de forma angular con 3 grados de libertad, así como también el eje Z que puede ajustar la distancia entre el *array* de fibras ópticas y la superficie del chip. Este posicionamiento es un procedimiento clave ya que realiza el acoplamiento y desacoplamiento de la luz de cada dispositivo fotónico incluido en el chip. La Figura 7.16, detalla el esquema de configuración de la estación de 6 ejes utilizada en este trabajo. Como se puede observar, al sistema principal se le añade una PC (con dos pantallas) y un analizador de perfiles de haz. El conjunto de fibras de

acoplamiento (FA) se basa en fibras de ranura en V 1x8 suministradas por OZ-Optics (Canadá). El diseño de este componente óptico se muestra en la Figura 7.17. Además, a la plataforma de 6 ejes se le adaptó un conjunto de microscopios ópticos con óptica adecuada para no bloquear la región de acoplamiento. Estos sistemas de visión permiten tomas frontales, laterales e isométricas del chip.

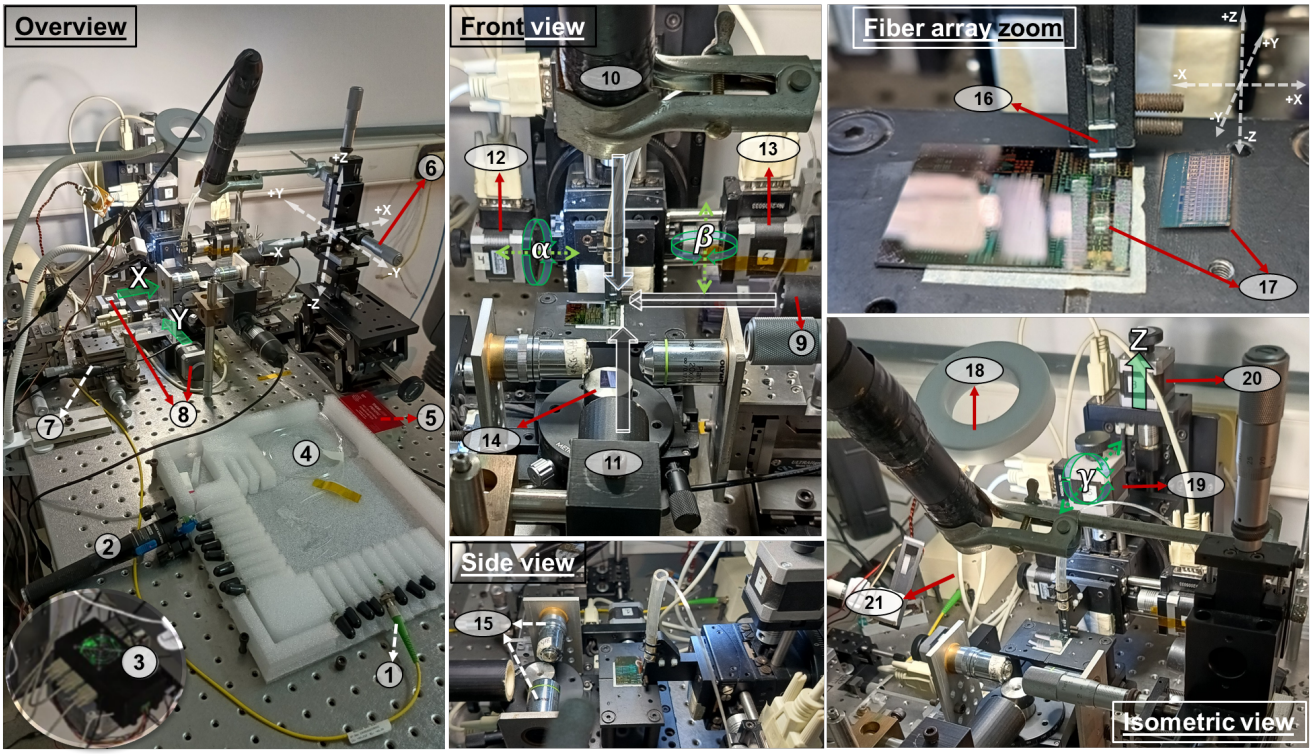


Figura 7.16: Configuración experimental utilizada para acoplar luz a las dispositivos fotónicas de silicio en SOI, mediante *grating couplers*. La estación motorizada se conforma por 6 ejes, los ejes (7),(8) para movimientos planos X-Y del chip. Los ejes (12), (13), (19) para movimientos angulares α, β, γ del *array* de fibras y (20) para desplazamientos Z en altura del *array*. Los microscopios (9), (10) y (11) son los componentes principales para respaldar este sistema. Además, al utilizar esta configuración, podemos integrar el chip (17) al conjunto de fibras (16). En esta figura también se incluyen otros componentes implementados como: (1) fibra de entrada, (2) láser visible para alineación, (3) controlador del motor, (4) fibras ópticas, (5) medidor de potencia, (6) posicionadores de microscopio, (15) objetivos microscopio, (7) posicionadores de objetivos microscopio, (14) base giratoria adaptada a los motores X-Y para acoplamiento por bordes, (18) aro de luz difusa y (21) láser sintonizable en la banda C.

Para manejar los motores paso a paso de la plataforma de 6 ejes, fue necesario desarrollar un sistema de control. Está construido en base a una placa de microcontrolador Arduino ESP32 y se utilizan seis controladores para motores paso a paso DRV8825, que permiten controlar la corriente de cada motor. El *firmware* se implementó usando C++ dentro del IDE de Arduino. La comunicación entre el controlador del motor y la PC, se produce a través de un puerto USB, lo

que permite a los usuarios enviar comandos $ASCII$ en serie para movimientos absolutos, relativos y de posición inicial, reporte de coordenadas, entre otras funcionalidades. Por ejemplo, el *firmware* puede generar movimientos sincrónicos o asincrónicos entre múltiples motores y a distintas velocidades[2].

Además, la Figura 7.17 ilustra la estrategia basada en las imágenes obtenidas por los microscopios ópticos incluidos en el montaje experimental. Estas imágenes muestran una vista frontal (a) y lateral (b) del conjunto chip-FA, siendo este el punto clave para tomar decisiones que determinen el punto inicial para el proceso de pre-alineación.

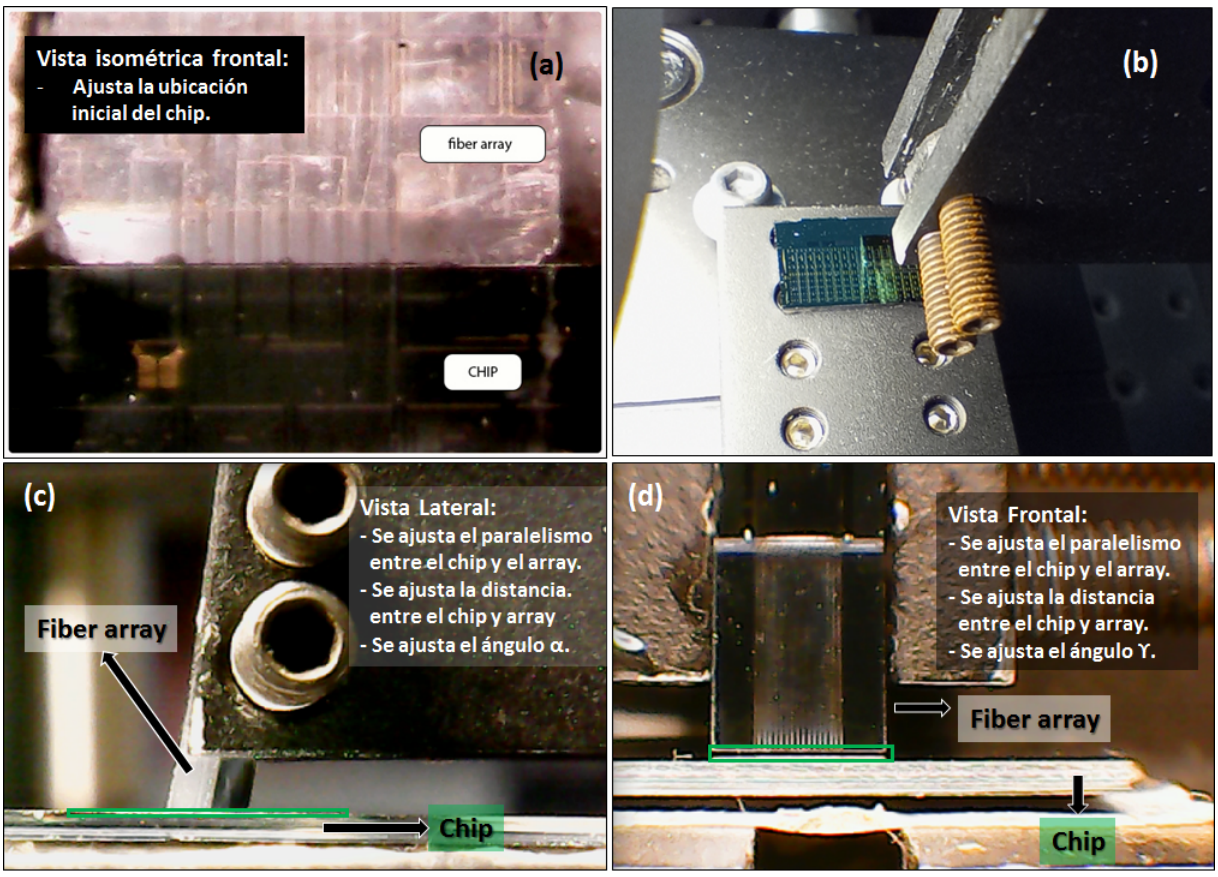


Figura 7.17: Vistas frontal, lateral e isométricas tomadas desde tres microscopios incluidos de la configuración experimental, que permiten acoplar luz láser en chips fotónicos.

En la Figura 7.17 podemos observar que en la imagen isométrica frontal 7.17(a), que el *array* se sitúa perpendicular al plano del chip utilizando el borde como línea de referencia. Por otro lado, desde la vista lateral 7.17(c) y frontal 7.17(d), se pueden observar dos líneas verdes que se utilizaron para guiar y apreciar el ángulo de elevación y los ángulos de inclinación, que son parámetros sensibles

[2]Para más detalles puede visitar https://github.com/rrpeyton/FIPC_Project

para la alineación del conjunto de fibras (FA) con el chip. Se puede observar, el posicionamiento descrito en esta imagen es el correcto. Además, podemos apreciar el ángulo α típicamente de alrededor 10° para un acoplamiento adecuado, entre el conjunto de fibras y el chip de silicio. Finalmente, la imagen 7.17(b), muestra una fotografía del proceso descrito.

7.4.6. Proceso de pre-alineación.

En primer lugar, mediante el uso de tres cámaras CCD ópticamente magnificadas, posicionamos el sistema chip-FA considerando el borde y el diseño correspondiente de cada chip fotónico. Estos microscopios ópticos toman diferentes puntos de vista, como frontal, lateral e isométrica frontal. Inicialmente colocamos el FA cerca de una de las esquinas del chip, el cual se pega a un portaobjetos y se fija a la estación motorizada, siendo este el punto de partida para comenzar el proceso de pre-alineación. Además, para realizar la pre-alineación, fue necesario iniciar una optimización en el proceso de acoplamiento, por lo que se desarrolló una rutina de software como se describe a continuación.

Después de posicionar el chip empleando la imagen tomada de la CCD frontal y comparada con el diseño del chip, buscamos un punto específico para acoplar la luz, en particular en el primer paso apuntamos el láser a la entrada de un *grating coupler* correspondiente al circuito óptico de un acoplador 1x1. Esta posición corresponde al punto de partida. Los acopladores 1x1 son circuitos sencillos, y se añaden a los diseños fotónicos incluidos en el chip, para estimar las pérdidas de acoplamiento comparando las señales de potencia de entrada/salida. Simultáneamente, podemos utilizar las imágenes en línea para optimizar esta primera etapa de alineación (Figura 7.18 a). De este proceso necesitamos al menos recibir una pequeña señal óptica del dispositivo integrado elegido (1x1), y luego iniciamos el proceso de pre-alineación.

Este proceso lo podemos respaldar mediante la inyección de luz láser visible (Figura 7.18 c) en alguno de los extremos de los *fiber arrays* (FA), y que sirve como una referencia más de posicionamiento al momento de acoplarnos en el chip. En general, cuando iniciamos el acople óptico, el FA se encuentran a una distancia prudente de la superficie (*cladding* de dióxido de silicio) del chip. El spot del láser (rojo) se puede observar en la superficie reflectante, lo que nos permite acercar el borde del chip fotónico hacia el spot (fijo) mediante el movimiento los motores X-Y. Una vez posicionado el spot del láser sobre el borde del chip, bajamos los FA hasta ubicarlos casi en contacto con la superficie del chip, esto mediante el movimiento del motor Z.

Luego, proyectando con cierto ángulo de incidencia la iluminación del aro led de luz difusa (Figura 7.16(18)) sobre la superficie del chip, se observa el reflejo de los patrones de los dispositivos integrados (silicio), y además se logra resaltar las entradas/salidas de los *gratings couplers*, que en particular se reflejan con un color rojizo, debido a su geometría y a su combinación de silicio y dióxido de silicio.

Finalmente, alineamos el spot del láser rojo (extremo derecho del FA de la Figura 7.18 a), con alguno de los *gratings couplers* del chip. Cabe destacar que cada una las fibras del FA están separados a 127 μm, por lo tanto, los *gratings couplers* integrados en el chip también se diseñaron separados a 127 μm o múltiplos de este valor. Con esto nos asegurados tener un buen punto de partida en base a la fibra que conduce el láser rojo, y para posicionarnos en las entradas y salidas de los dispositivos de interés, comandamos movimientos de 127 μm en los motores a lo largo del eje X (izquierda-derecha).

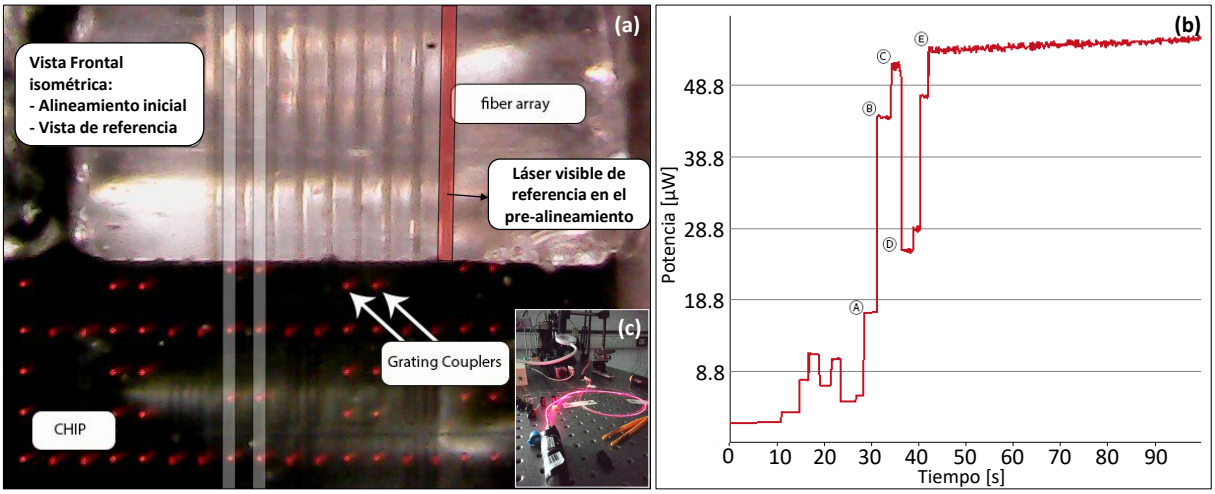


Figura 7.18: a) Imagen tomada desde el microscopio frontal isométrico que muestra varios puntos de luz iluminados. Estas corresponden a señales reflectantes provenientes de los *grating couplers* bajo iluminaciones de luz led difusa con cierto ángulo de incidencia. Como se puede observar, dos *gratings* están alineados con dos fibras pertenecientes al conjunto *fiber arrays* (FA). Las líneas de puntos siguen la estrategia realizada para este procedimiento. b) Representación de datos después de ejecutar la rutina de pre-alineación. Como se puede observar, se está alcanzando un claro punto máximo, por lo que corresponde al punto de partida óptimo para los experimentos. Este gráfico representa la potencia de salida en función del tiempo optimizando el punto en el plano X-Y dentro de la zona explorada.

Ahora el siguiente paso es optimizar el acople FA-chip en el procedimiento de pre-alineación, y se basa en realizar varios recorridos de ida y vuelta alrededor del punto de partida, escaneando con una forma rectangular, una matriz de puntos construida sobre plano X-Y. El escaneo cubre muchos pasos ubicados cada 2 μm para cada eje. Se registró la potencia óptica recibida por cada punto mediante

un conversor digital/analógico (D/A) procedente de una tarjeta LabJack conectada vía USB a una PC. Después de analizar los datos podemos identificar la posición donde encontramos la señal más alta, lo que significa la posición para el mejor acoplamiento óptico. En la Figura 7.19 presentamos los datos obtenidos siguiendo el procedimiento de pre-alineación comentado anteriormente. Se puede observar, la distribución de potencia registrada en la señal de salida puede ser útil para encontrar la condición más adecuada para el acoplamiento de luz en estas estructuras fotónicas integradas. Como se puede observar, los puntos negros corresponden a los mejores puntos de acoplamiento obtenidos siguiendo la estrategia de alineación comentada.

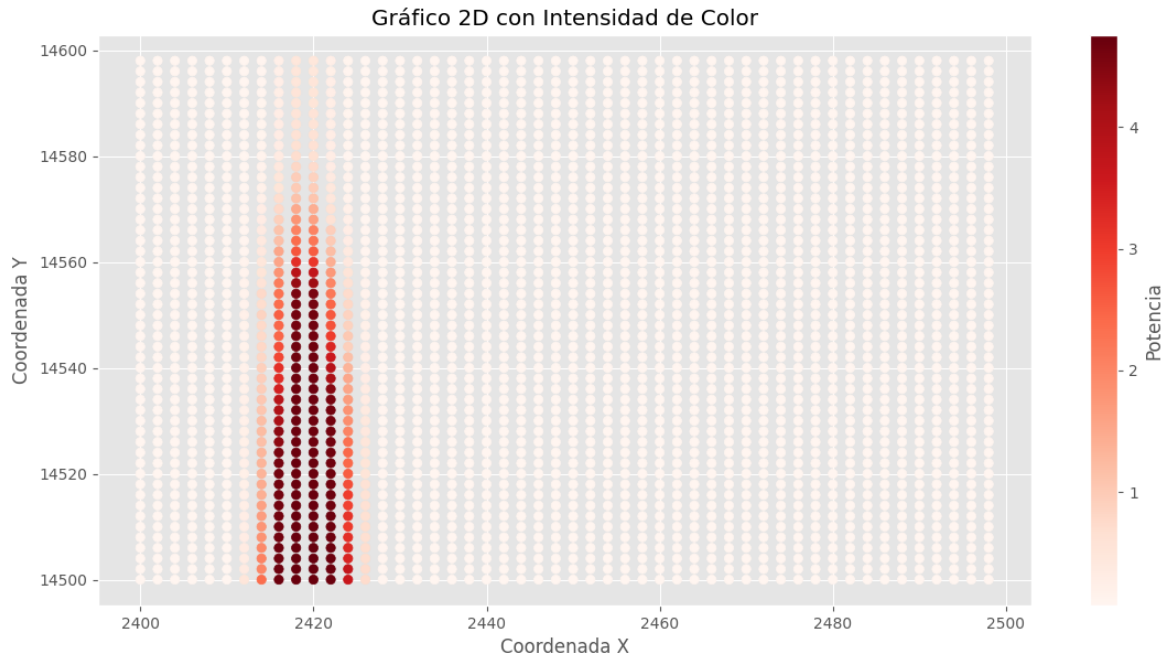


Figura 7.19: Mapa de color: distribución de potencia registrada en la señal de salida, permite encontrar la condición más adecuada para el acoplamiento de luz hacia los dispositivos fotónicos integrados.

Luego de concluir el procedimiento de pre-alineación posicionamos el chip dentro de la región explorada y comenzamos a mejorar la potencia de salida del circuito óptico explorado. Para ello, en la Figura 7.18 (b) mostramos el proceso de optimización adicional bajo control con incrementos mínimos con la estación motorizada X-Y. Como se puede observar, nos movimos de izquierda a derecha (eje X) y de arriba a abajo (eje Y), y en cualquier caso volvimos al punto anterior. En la misma figura, hemos mostrado varios puntos relevantes etiquetados como A, B, C y D. Cada etiqueta detalla los cambios en la potencia de salida al cambiar los controles de movimientos X-Y. A partir de estos datos, podemos ver que las

señales arriba-abajo siguen la estrategia anterior (moviéndose hacia la izquierda o hacia la derecha para el eje X o hacia arriba Y hacia abajo para el eje Y) para optimizar la potencia de salida. Finalmente, en el punto D, se observa una meseta de la potencia registrada, lo que revela la estabilidad de la luz acoplada en el sistema fotónico. También se señala que la diferencia observada para la potencia de los puntos C y D, está asociada con problemas de histéresis de los sistemas mecánicos en los motores paso a paso.

Después de eso, agregamos un procedimiento adicional para mejorar la señal de salida del circuito óptico acoplador 1x1, de modo que cambiamos con unos pocos pasos en los motores, la posición angular del conjunto de fibras (FA), controlando el paso del motor con la resolución mecánica más baja permitida y para cada ángulo de rotación. En particular, sabemos que la variación más sensible está relacionada con el desplazamiento lateral ya que la aceptación angular del *grating coupler* desde el ángulo de elevación es mayor. Además, la rotación angular correspondiente a los ángulos laterales y el eje z fueron de cambios pequeños. El aumento de potencia registrado después de realizar la última rutina, podría producir un incremento importante de aproximadamente un factor hasta dos con respecto al valor inicial. Para llevar a cabo este último paso, se hizo un cambio en el detector, por lo que necesitamos hacer más exploraciones de sensibilidad y lograr aumentar el valor de las señales en la salida del circuito óptico bajo inspección. Para ello hemos utilizado un medidor de potencia de germanio (de Thorlabs Inc.USA). Finalmente, cuando optimizamos el proceso de alineación, medimos la potencia de cada salida para los divisores de potencia 1x2, 1x4 y 1x8 explorados.

7.4.7. Caracterización de Divisores de potencia 1x2, 1x4 y 1x8 SCC + MMI bajo la plataforma SOI.

Después de optimizar y finalizar la alineación del circuito óptico 1x1, pasamos a probar cada divisor de potencia 1x2, 1x4 y 1x8 en las misma secciones de los circuitos acopladores 1x1, guiándonos por las tres cámaras CCD magnificadas y el plano CAD del chip fotónico. Entonces, comenzamos con el procedimiento de re-alineación en cada divisor y luego realizamos un ajuste fino manualmente utilizando el software de control de la estación motorizada de 6 ejes. En este sentido, se realiza un pequeño ajuste de las posiciones de las fibras del sistema chip-FA del sistema. En este paso producimos pequeños cambios en el eje Z y las posiciones angulares sobre los planos X-Y donde está el chip fotónico. Este procedimiento significa un pequeño cambio de la elevación y los ángulos laterales. Como consecuencia, obtendremos un aumento de la señal óptica dos o tres veces

mayor que la original.

En esta sección se muestran los resultados de la potencia transmitida en los divisores, previamente simulados y optimizados siguiendo la misma metodología descrita en la sección 7.4.2, que respaldan un diseño adecuado y más pequeño para los divisores de potencia analizados en este trabajo. Se fabricó el dispositivo divisor de potencia propuesto SCC+MMI, y a modo de comparación, también se fabricó un divisor MMI estándar proporcionado en los bloques de la biblioteca del fabricante (Cornestone). En base a los resultados de las simulaciones, se envió a fabricar un chip fotónico (10 mm x 15 mm) que incluye varios sistemas correspondientes a divisores 1x2 y 1x4 para ambas arquitecturas de diseño (SCC+MMI y MMI estándar) y para divisores de 1x8 los diseños son solo SCC. Todos los dispositivos fotónicos integrados en el chip SOI, fueron medidos con la plataforma automática de acople por *grating couplers* desarrollada en este trabajo. Luego se desarrollo un programa en Python para tratamiento de datos. La referencia tomada es en base al acoplador 1x1 integrado en el chip, descartando pérdidas por fibras, por acople y conectores.

Primero se realizaron medidas correspondientes a splitters 1x2 de los dos modelos analizados en este trabajo (MMI estándar y nuestro diseño SCC). Se midió la transmisión óptica entre 1530 nm y 1560 nm para ambos puertos de salida (A y B) correspondientes a cada dispositivo.

Para comparar los resultados obtenidos, hemos elaborado una tabla que también incluye valores recuperados de diferentes estrategias/tecnologías de la literatura para diseñar y fabricar un divisor de potencia 1x2.

Tabla 7.2: Pérdidas ópticas para un divisor de potencia 1x2 fabricado por diferentes tecnologías y/o estrategias de diseño en la plataforma SOI.

Diseño/Tecnología	**Pérdidas ópticas (a 1550 nm) dB/rama**	**Referencia**
MMI	3.06	[23]
MMI	3.16	[24]
MMI	**3.7**	**este trabajo**
Rama-Y	3.1	[25]
MMI+SCC	**3.6**	**este trabajo**
Plasmónico + SOI	3.1 (simulado)	[26]

A continuación, presentamos los resultados obtenidos para la transmisión óptica 1x4 para ambos diseños fotónicos analizados en este trabajo, los cuales se esquematizan en la Figura 7.20. En el chip fabricado se contaba con 5 divisores 1x4 SCC, y 5 divisores 1x4 MMI estándar, se midieron todos los dispositivos y se

hizo la estadística.

Para el divisor de potencia SCC propuesto: por un lado, podemos apreciar que todos los puertos muestran el mismo comportamiento para la transmisión óptica en función de la longitud de onda de propagación. Sin embargo, podemos resaltar que los puertos B y C presentan una ligera planitud en función de la longitud de onda. La transmisión óptica va de -9 a -16 dB (puerto B y C). De acuerdo con el divisor 1x2, todos los puertos muestran una mayor transmisión en la longitud de onda más corta (1530 nm). Para longitudes de onda más grandes, la transmisión óptica cae más de 10 dB (puerto A y D).

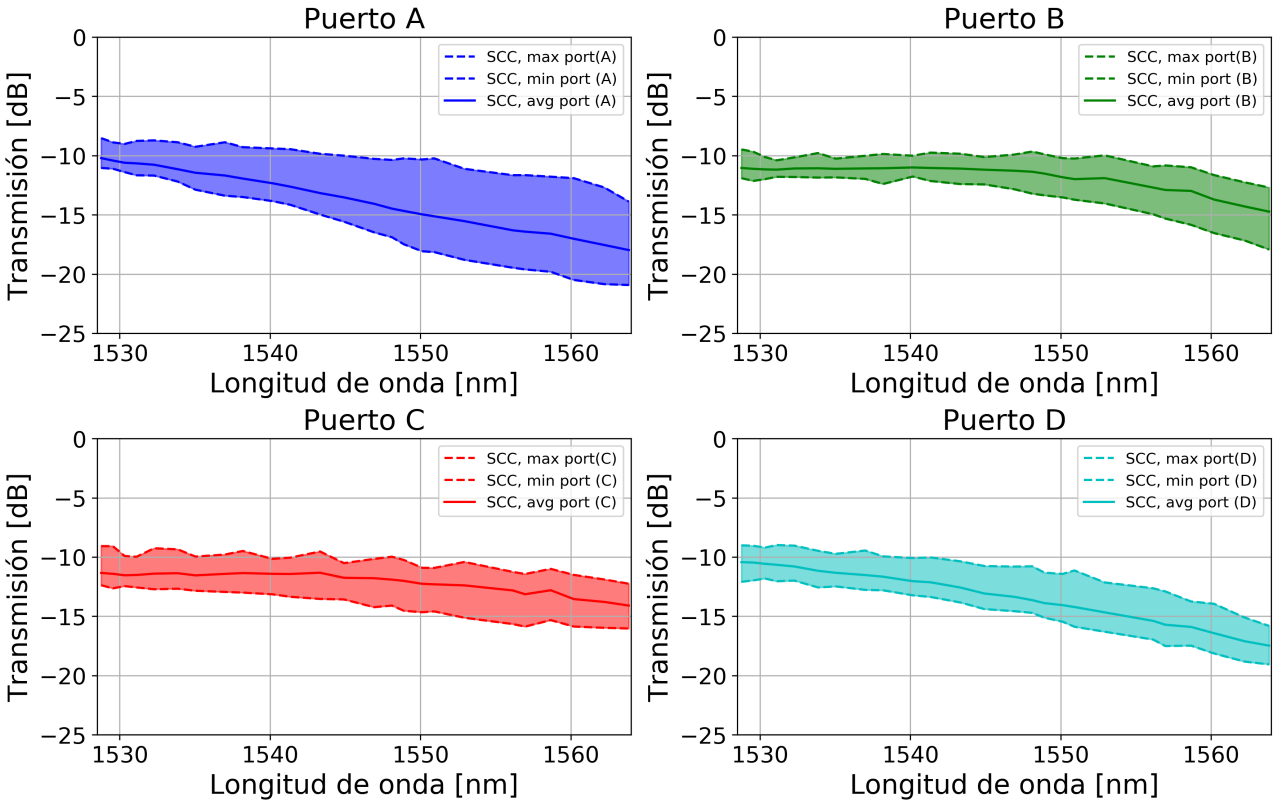


Figura 7.20: Respuesta de transmisión óptica del divisor SCC 1x4 en función de la longitud de onda propagada. Cada puerto se analizó como se muestra en esta figura. La línea continua corresponde al valor promedio, mientras que la región sombreada representa el rango de confianza. Los límites superior e inferior se indican con líneas discontinuas para el rango de confianza de estos datos experimentales. Acople *fiber-to-chip* mediante *grating couplers*.

Por otro lado, en la Figura 7.21 se muestra la respuesta óptica correspondiente al divisor MMI 1x4. Se puede observar un comportamiento similar al del dispositivo SCC. Podemos apreciar una respuesta un poco plana en las curvas correspondientes a los puertos B y C. Estos puertos muestran menores pérdidas de propagación ya que a 1530 nm la transmisión óptica aumenta hasta 7 dB con

respecto a la longitud de onda centrada en 1560 nm. Además, el puerto C presenta un ligero aplanamiento en la transmisión en función de la longitud de onda propagada en los divisores MMI. Este hecho puede estar asociado con el comportamiento aleatorio del proceso de fabricación, con su tolerancia en la forma y errores de diseño del MMI, que pueden evitar la respuesta de longitud de onda habitual para este tipo de dispositivos fotónicos.

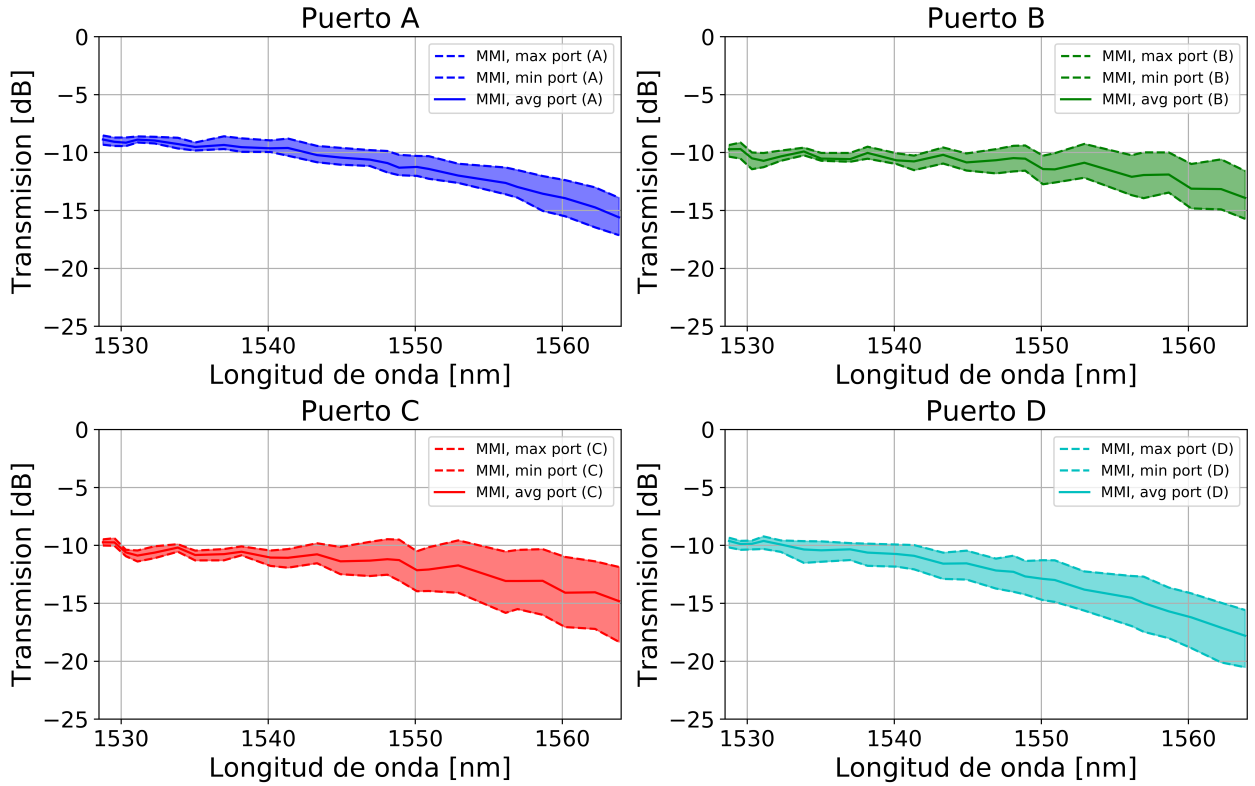


Figura 7.21: Respuesta de transmisión óptica correspondiente al divisor MMI 1x4 en función de la longitud de onda propagada. De cada panel, la línea continua corresponde a los datos promedio. Además, las líneas discontinuas superior e inferior de cada imagen representan el rango de confianza de estos datos experimentales. Acople *fiber-to-chip* mediante *grating couplers*.

Finalmente, en la Figura 7.22 se presentan los resultados obtenidos para la transmisión óptica 1x8 del diseño fotónico propuesto en este trabajo. El chip fabricado contaba con 5 divisores 1x8 SCC y se procedió a medir todos los dispositivos.

Después de hacer la estadística de todos los dispositivos y en todos los puertos, podemos apreciar que los puertos 1, 3, 4, 5, 6 y 8 muestran el mismo comportamiento para la transmisión óptica en función de la longitud de onda de propagación. Los mismos presentan una ligera planitud en función de la longitud de onda y la transmisión óptica va de -14 a -22 dB.

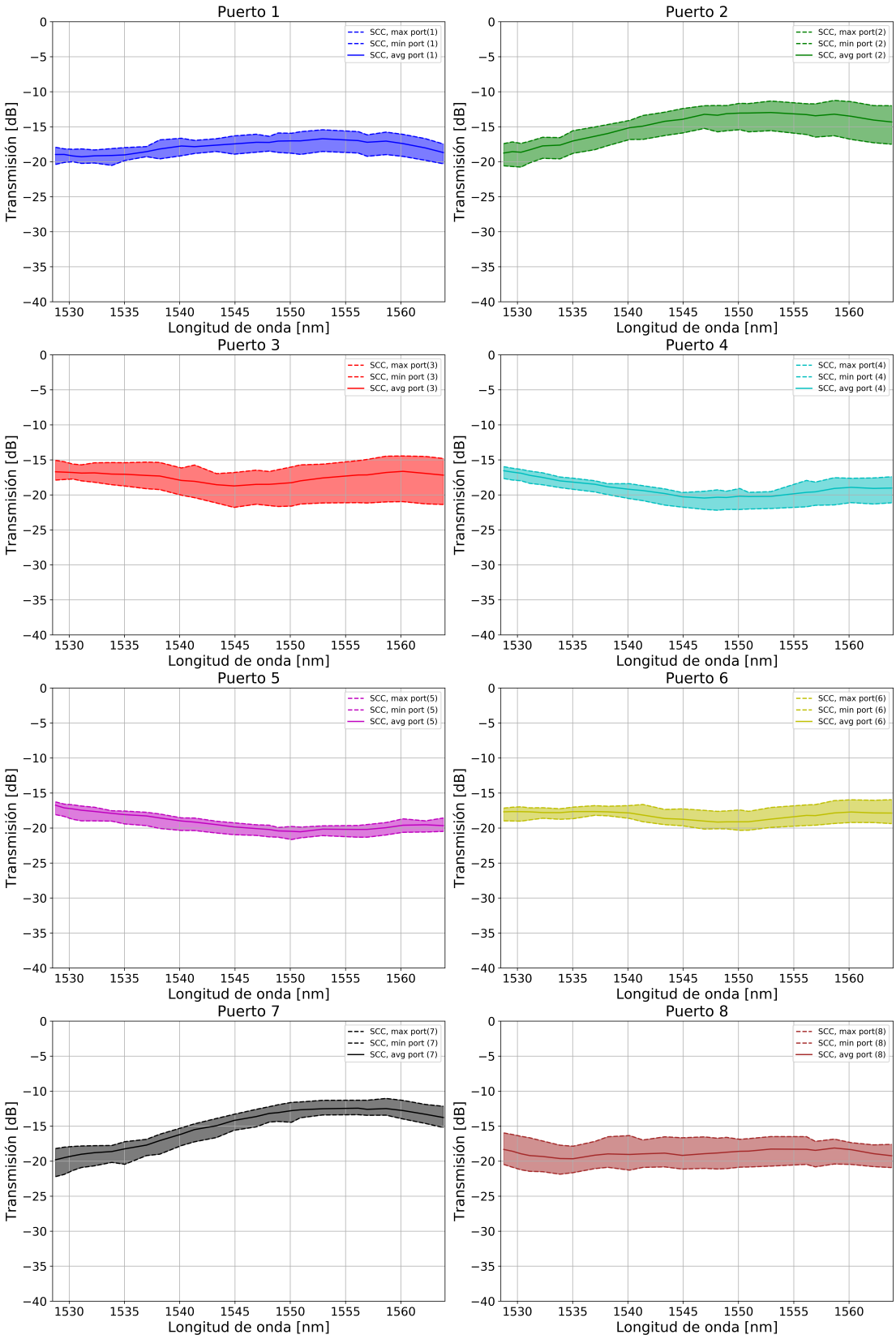


Figura 7.22: Resultados de la transmisión óptica de splitters SCC+MMI 1X8 en función de la longitud. La línea continua corresponde a los datos promedio. Las líneas discontinuas superior e inferior de cada panel representan el rango de confianza de estos datos experimentales.

Sin embargo, podemos resaltar que los puertos los 2 y 7 presentan una respuesta de mayor transmisión en longitudes de onda mas largas (pico en $\lambda = 1558$ nm), y con una mayor dispersión, que va desde -11 a -22 dB. Este fue un resultado no esperado, la Figura 7.14(a), podemos observar que los puertos 2 y 7 comparten algo en común, y es que se encuentran a la misma distancia del puerto de entrada (son ante últimos en los extremos de cada lado). Este comportamiento en ambos puertos podría vincularse a la geometría especial utilizada en el diseño optimizado que tiene en cuenta el efecto SCC, como se observó en la Figura 7.3, en donde se evidencia muchas oscilaciones fuertes en función del parámetro de longitud (L_2). Este parámetro puede tener distorsiones aleatorias por las tolerancias tecnológicas del proceso de fabricación, y en consecuencia modificar la respuesta espectral esperada en estos puertos. Sin embargo, estos fueron los puertos que mayor transmisión alcanzaron (-11 dB).

En resumen, se fabricó y se evaluaron los diseños de los divisores, estos son: el modelo propuesto del divisor de potencia SCC+MMI y se comparó su rendimiento con los divisores MMI estándar, logrados en el mismo chip fotónico en la plataforma SOI.

En conclusión, el diseño innovador para dividir la luz da como resultado un sistema muy compacto y también muestra rendimientos similares a otros modelos de divisores de potencia fabricados con diferentes tecnologías. Cabe señalar que el diseño propuesto resultó ser casi nueve veces más pequeño que otro dispositivo de uso común con comportamiento similar.

La estrategia propuesta de diseño de divisores de potencia abre una nueva ruta para diseñar y fabricar circuitos fotónicos bajo la plataforma de silicio, no solo en SOI, sino también por obleas de nitruro de silicio y oxinitruro de silicio, son adecuadas para explorar otros rangos espectrales como la región del infrarrojo medio (MIR) y mejorar la confiabilidad considerando la tolerancia de fabricación para dispositivos fotónicos más grandes. A pesar de esto, mediante la plataforma SOI existen reportes en donde se a explorado dispositivos fotónicos en el rango MIR y NIR, gracias a su transparencia en longitudes de onda largas (aprox. 20μm).

7.4.8. Integración del acoplamiento chip-fibra y pruebas en tiempo real.

El siguiente paso, trata la integración del sistema chip-FA para obtener una pieza robusta que pueda ser manipulada durante el empaquetado. En este sentido, hemos pegado este "tándem" utilizando un pegamento óptico aeroespacial, NOA 68 de Norland (EE.UU.). Este producto es un fotopolímero líquido que se cura

cuando se expone a luz ultravioleta por debajo de 400 nm. Se debe exponer más de 20 hs con luz ultravioleta. En nuestro caso utilizamos dos LED de 1W y un láser de 100 mW durante 24 horas. Cuando NOA 68 alcanzó un curado completo, observamos una muy buena adhesión y resistencia a los solventes. La adhesión óptima también se puede obtener curando el pegamento óptico a 50° C durante 12 horas.

Para controlar cuidadosamente el proceso de curado del pegamento, monitoreamos en tiempo real la señal óptica de salida detectada por el medidor de potencia de con cabeza de germanio (Thorlabs Inc.USA). Además, el resto de salidas ópticas del sistema se midieron directamente desde una fibra óptica desnuda utilizando un *Beam Profiler Analyzer* de Newport Inc. (EE. UU.). Finalmente, analizamos la potencia de cada salida del *splitter* SCC 1x8 una vez alcanzado perfectamente el procedimiento de curado. Los datos obtenidos se presentan en la Tabla 7.3 donde se compara con los valores antes del proceso de curado.

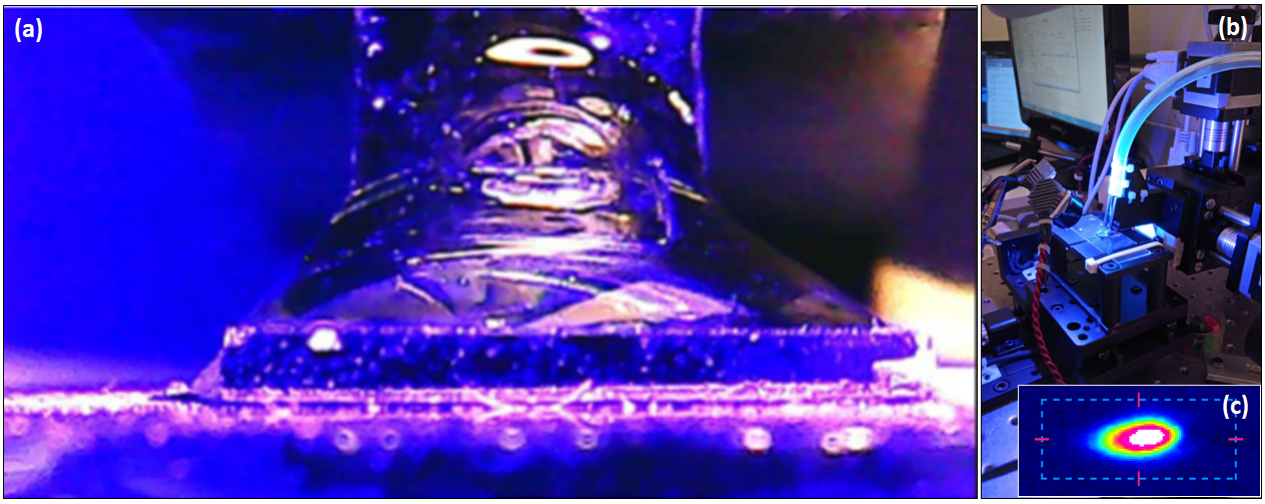


Figura 7.23: (a) Se muestra una fotografía bajo iluminación ultravioleta durante el último paso del proceso de curado. Esta imagen nos permite apreciar la forma y algunos detalles correspondientes al proceso de pegado. Como se puede observar se obtiene un pedestal sólido del pegamento, y a partir de éste se pudo obtener una pieza única y sólida para el conjunto chip-FA. (b) Se presenta una fotografía del sistema tomada durante el proceso de curado UV y (c) también se muestra un modo de una fibra desnuda correspondiente a una salida del *splitter* 1x8. Los modos se capturan con un *Beam Profiler Analyzer* LBP-4-USB de Newport.

De la Tabla 7.3 resumimos los valores medidos en cada puerto correspondiente al divisor de potencia 1x8 desarrollado por la tecnología SCC. Presentamos las medidas antes y después de 24 hs de iniciado el proceso de pegado utilizando pegamento aeroespacial, curado con UV a temperatura controlada de 24°C.

La Tabla 7.4 resume los valores promedio de las pérdidas de exceso (*excess*

Tabla 7.3: Pérdidas de inserción para cada puerto del divisor 1x8, antes y después del proceso de curado UV.

Canal	Pérdidas de Inserción antes de curado UV (dB)	Pérdidas de inserción Después del curado UV (dB)
1	18,7	16,4
2	16,5	15,9
3	16,5	14,7
4	16,4	14,8
5	16,6	15,0
6	17,4	15,2
7	17,1	15,4
8	18,6	– [3]
Pérdidas Promedio	**17,2**	**15,4**

loss) para el divisor de potencia 1×8 desarrollado en este trabajo. De esta tabla (7.4) podemos observar que las pérdidas de exceso se reducen ligeramente (cerca de 1.6 dB menos para el sistema pegado). Este hecho está asociado al mejor acoplamiento óptico que brinda el pegamento al igualar el índice de refracción entre el chip y el *array* de fibras (FA). Por lo tanto, esta situación evita que la capa de aire que se produce en la interfaz (SOI-aire) genere un incremento de la apertura numérica, y en consecuencia, mucha luz resulte desacoplada del chip.

Tabla 7.4: Pérdidas en exceso (*excess loss*) del divisor de potencia 1×8 antes y después del ensamblaje y del proceso de curado UV. Para más detalles en [27].

Divisor 1×8 (SOI)	Pérdida en exceso (dB)	Método de acoplamiento
Nuestro divisor antes del curado UV (promedio)	5.4 ($\pm$0.8)	*grating coupler*
Nuestro divisor después del curado UV (promedio)	4.2 ($\pm$0.5)	*grating coupler*
Nuestras simulaciones (promedio)	1.5 ($\pm$0.5)	—
Referencia [28]	7.6	*end-fire*
Referencia [29]	1.28	*end-fire*)
Referencia [30]	6.74	*tapped fiber*

Los resultados obtenidos son comparables a los reportados para divisores de potencia fabricados en SOI utilizando varios esquemas, como Y-branch y MMI [28, 29, 30]. Además, las simulaciones numéricas indican que las pérdidas en exceso es de aproximadamente 1,5 dB. La discrepancia entre los resultados experimentales y las simulaciones se puede explicar por dos factores principales: 1) no se consideró la polarización de la luz láser para el acoplamiento a los divisores, y 2) la pérdida en exceso también podría atribuirse a imperfecciones en el proceso de fabricación.

7.4.9. Empaquetado (diseño, integración e instalación de interfaces de E/S)

Teniendo en cuenta el uso final del divisor de potencia implementado en este trabajo, diseñamos un *case* adecuado para integrar nuestro sistema y que sea apto para su instalación como parte de las redes FTTH. En este sentido, para obtener

un prototipo muy rápido y de bajo coste, se realizó la impresión 3D utilizando filamentos PLA. El empaquetado incluye principalmente las pinzas internas para enrollar la fibra óptica recubierta de acrilato, así como para incorporar los soportes para los conectores rápidos de fibra óptica (SC-UPC). Como se puede observar, en la Figura 7.24 se presenta un esquema del *case* diseñado e implementado para nuestro divisor óptico. Se observa que las abrazaderas están diseñadas para que sea fácil enrollar los caminos de la fibra óptica, considerando el gran diámetro de la fibra (alrededor de 10 cm) para evitar pérdidas por flexión y también efectos de birrefringencia. Además, el diseño del paquete incluye el soporte para los conectores de fibra, y también el estuche incluye los agujeros de los tornillos para cerrarlo.

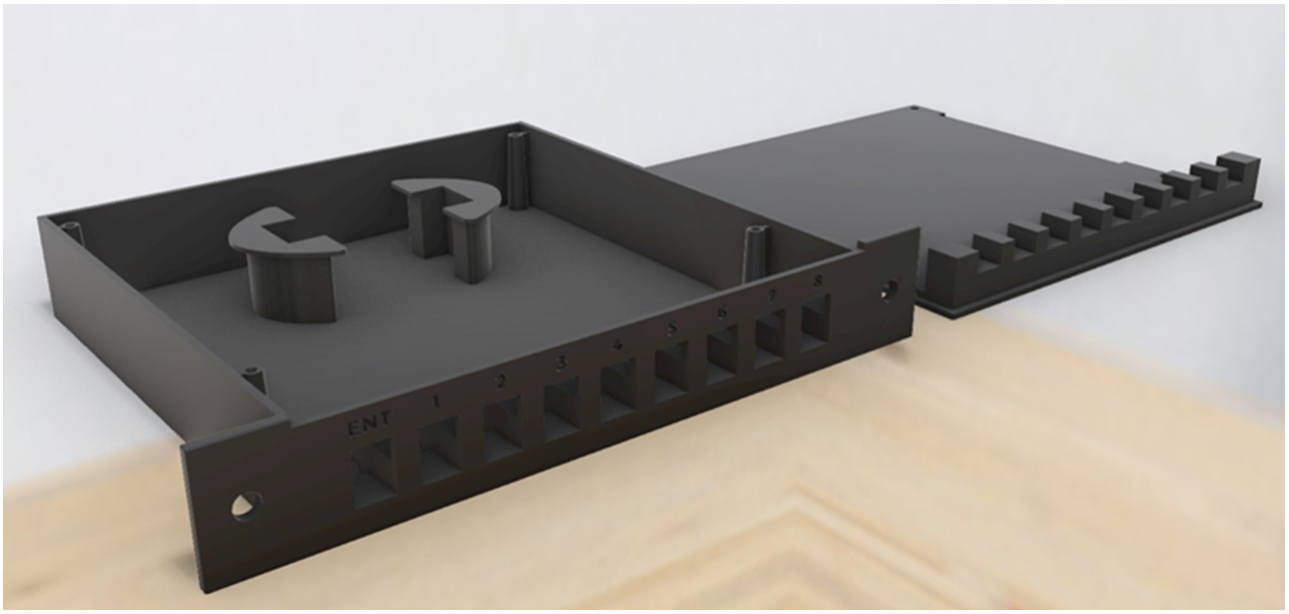


Figura 7.24: Los detalles principales corresponden a la vista interior del case. Esta imagen muestra el diseño de empaquetado final del divisor de potencia 1x8 SCC como una caja abierta. Se detalla la abrazadera para la bobina de fibras, así como el soporte para las interfaces ópticas de E/S.

Además de considerar que la luz se acopla desde arriba y el proceso de enrollado de la fibra óptica dentro de la caja, se optimizó el proceso de integración y se decidió ubicar el sistema chip-fibra en el lateral izquierdo de la caja. Asimismo, atendiendo a los requisitos de las interfaces de entrada/salida, el sistema dispone de una entrada y ocho salidas ópticas, facilitando conexiones rápidas mediante fibra (SC/UPC).

Como se puede observar en la Figura 7.25, se muestra el *case* fabricado para alojar el sistema divisor de potencia integrado. El panel(a) presenta al *case* abierto que detalla la ubicación del chip y el bobinado de la fibra óptica. Además, de este

panel podemos observar los conectores SC-UPC bien situados en el *case* diseñado. El panel (b) muestra el *case* cerrado y es prototipo final del divisor de potencia desarrollado en este trabajo.

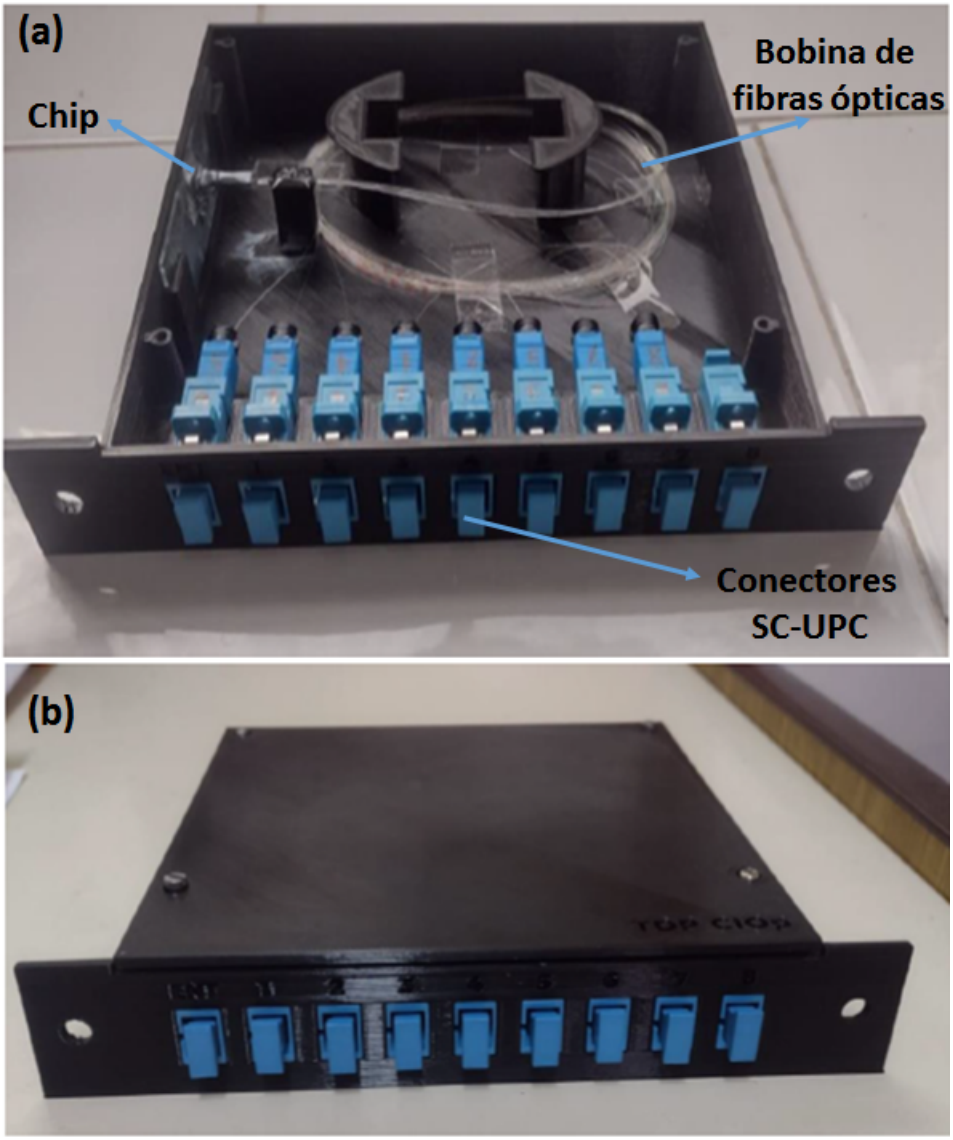


Figura 7.25: Esta imagen muestra el prototipo abierto (panel a) y cerrado (panel b) del divisor de potencia fabricado e integrado en este trabajo. Desde la Figura (a) podemos observar los detalles interiores del diseño de la caja. Como se puede observar, la ubicación del chip-FA, las abrazaderas para enrollar la fibra y los conectores rápidos (interfaces I/O). La Figura (b) muestra el prototipo final listo para ser instalado en la red FTTH.

En resumen, en esta sección presentamos una forma sencilla, rápida y económica de integrar un divisor de potencia 1x8 fabricado con la plataforma del Silicio Sobre Aislante (*Silicon On Insulator*-SOI). Además, describimos un proceso completo para producir este sistema fotónico, desde el diseño, fabricación, integración

y prueba del divisor de potencia propuesto bajo la plataforma SOI. Por otro lado, prestamos mucha atención al procedimiento del paso de integración, donde se consideraron y realizaron bien la pre-alineación y pequeños ajustes para mejorar la potencia de salida. Asimismo, para desarrollar e implementar el empaquetado (*packaging*) de este sistema, utilizamos la impresión 3D para realizar un prototipo óptico integrado de rápida funcionalidad y bajo coste. Obtuvimos un sistema fotónico adecuado que reporta una pérdida de inserción de alrededor de 15 dB, adecuado para aplicaciones de telecomunicaciones en redes FTTH. Este es un buen valor teniendo en cuenta las tecnologías de empaquetado y el rápido proceso logrado para llevar a cabo el dispositivo integrado propuesto. Además, este trabajo ofrece los pasos secuenciales necesarios para seguir un proceso sencillo de integración y empaquetado para un divisor de potencia 1x8 desarrollado bajo la tecnología de la fotónica de silicio.

El nuevo diseño del divisor de potencia, así como el procedimiento de integración y empaquetado presentados en este trabajo, abren la posibilidad de adquirir varios pasos y procesos de implementación que pueden realizarse fácilmente en laboratorios de baja complejidad e incluso en talleres de universidades.

Referencias

[1] Roberto R. Peyton. «Estudio, diseño y caracterización de dispositivos fotónicos integrados fabricados con diferentes plataformas tecnológicas». Tesis doct. Buenos Aires, Argentina: Universidad Nacional de Quilmes, 2022. URL: http://ridaa.unq.edu.ar/handle/20.500.11807/3625.

[2] Yi Zhang et al. «A compact and low loss Y-junction for submicron silicon waveguide». En: *Optics Express* 21.1 (2013). cit. on pp. 111, 112, págs. 1310-1316.

[3] H. F. Taylor. «Power loss at directional change in dielectric waveguides». En: *Applied Optics* 13 (mar. de 1974), pág. 642.

[4] R. Peyton et al. «Kinematic parameters in a low-loss power splitter written by femtosecond laser micromachining». En: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 28.5 (2018), pág. 055011.

[5] L. M. Johnson y F. J. Leonberger. «Low-loss LiNb03 waveguide bends with coherent coupling». En: *Opt. Lett.* 8.2 (1983), págs. 111-113.

[6] Jenn-Jia Su y Way-Seen Wang. «Novel coherently coupled multisectional bending optical waveguide». En: *IEEE Photonic Tech. L.* 14.8 (2002), págs. 1112-1114.

[7] Chih-Wei Hsu, Hsuen-Li Chen y Way-Seen Wang. «Compact Y-branch power splitter based on simplified coherent coupling». En: *IEEE Photonic Tech. L.* 15.8 (2003), págs. 1103-1105.

[8] M. Qiu y S. He. «A nonorthogonal finite-difference time-domain method for computing the band structure of a two-dimensional photonic crystal with dielectric and metallic inclusions». En: *Journal of Applied Physics* 87.12 (2000), págs. 8268-8275.

[9] L. M. Johnson y F. J. Leonberger. «Low-loss LiNbO3 waveguide bends with coherent coupling». En: *Integrated Optics and Optical Fiber Communication*. OSA, 1981.

[10] M. Bachmann, P. A. Besse y H. Melchior. «General self-imaging properties in nxn multimode interference couplers including phase relations». En: *Applied Optics* 33.18 (1994), págs. 3905-3911.

[11] I. Krutov et al. «Optimized low-loss integrated photonics silicon-nitride y-branch splitter». En: *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2241. 1. AIP Publishing LLC, 2020, pág. 020027.

[12] Luigi Ranno et al. «Integrated Photonics Packaging: Challenges and Opportunities». En: *ACS Photonics* 9.11 (2022), págs. 3467-3485. DOI: 10.1021/acsphotonics.2c00891.

[13] Giovan Battista Preve. «Problems, challenges, and a critical survey on automated silicon photonics packaging and optical interconnection». En: *Proc. SPIE 10924, Optical Interconnects XIX*. 2019, pág. 1092415. DOI: 10.1117/12.2513593. URL: https://doi.org/10.1117/12.2513593.

[14] Jeroen Missinne et al. «Silicon photonic temperature sensor: from photonic integrated chip to fully packaged miniature probe». En: *J. Optical Microsystems* 4.1 (2023), pág. 011005. DOI: 10.1117/1.JOM.4.1.011005. URL: https://doi.org/10.1117/1.JOM.4.1.011005.

[15] D. Rotta et al. «The ESA project PIOTS: setting up a complete pilot line for the packaging of photonic integrated circuits for space applications». En: *Proc. SPIE 11852, International Conference on Space Optics — ICSO 2020*. 2021, 118525G. DOI: 10.1117/12.2599959. URL: https://doi.org/10.1117/12.2599959.

[16] D. Pérez-López, A. Gutierrez, D. Sánchez et al. «General-purpose programmable photonic processor for advanced radiofrequency applications». En: *Nature Communications* 15 (2024), pág. 1563. DOI: 10.1038/s41467-024-45888-7. URL: https://doi.org/10.1038/s41467-024-45888-7.

[17] Lukas Chrostowski y Michael Hochberg. *Silicon Photonics Design: From Devices to Systems*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2015.

[18] Katsunari Okamoto. *Fundamentals of Optical Waveguides*. 2nd. San Diego, CA: Academic Press, 2006. ISBN: 978-0125250962.

[19] Liangshun Han et al. «Two-mode de/multiplexer based on multimode interference couplers with a tilted joint as phase shifter». En: *Optics Letters* 40.4 (2015), págs. 518-521.

[20] Qingzhong Deng et al. «Arbitrary-ratio 1x2 power splitter based on asymmetric multimode interference». En: *Optics Letters* 39.19 (2014), págs. 5590-5593.

[21] Juerg Leuthold et al. «Spatial Mode Filters Realized with Multimode Interference Couplers». En: *Optics Letters* 21.11 (1996), págs. 836-838.

[22] R. Peyton J. Martínez, D. Presti y G. Torchia. «Small Multimode Interferometer with Simplified Coherent Coupling Branches Used to Develop a Lower Footprint Power Splitter on Silicon-on-Insulator Platform». En: *Optical Engineering* 64.1 (28 de ene. de 2025), pág. 017104. DOI: 10.1117/1.OE.64.1.017104.

[23] D. P. Nair y M. Ménard. «A compact low-loss broadband polarization independent silicon 50/50 splitter». En: *IEEE Photonics Journal* 13.4 (2021), págs. 1-7.

[24] Shamsul Hassan y Devendra Chack. «Design and analysis of polarization independent MMI based power splitter for PICs». En: *Microelectronics Journal* 104 (2020), pág. 104887.

[25] Zhe Xiao et al. «Ultra-compact low loss polarization insensitive silicon waveguide splitter». En: *Optics Express* 21 (2013), págs. 16331-16336.

[26] Xueshuang Wang et al. «A compact silicon hybrid plasmonic waveguide polarization controller for high density silicon photonics integration». En: *Proceedings of SPIE*. Vol. 12935. Fourteenth International Conference on Information Optics and Photonics (CIOP 2023). SPIE, 2023, 129354T. DOI: 10.1117/12.3008102. URL: https://doi.org/10.1117/12.3008102.

[27] J. Martínez V. et al. «Design, fabrication, testing, and packaging of the 1 × 8 power splitter developed under the SOI platform». En: *Appl. Opt.* 64.6 (feb. de 2025), págs. 1427-1434. DOI: 10.1364/AO.541307. URL: https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-64-6-1427.

[28] I. S. Krubhakar, R. Narendran y B. K. Das. «Design and Fabrication of Integrated Optical 1 × 8 Power Splitter in SOI Substrate Using Large Cross-Section Single-Mode Waveguides». En: *Proc. SPIE*. Vol. 8173. 2011, pág. 81730C.

[29] S. H. Tao, Q. Fang, J. F. Song et al. «Cascade Wide-Angle Y-Junction 1 × 16 Optical Power Splitter Based on Silicon Wire Waveguides on Silicon-on-Insulator». En: *Opt. Express* 16 (2008), págs. 21456-21461.

[30] G. Fan, Y. Li y B. Han. «A Wide Wavelength Range of 1 × 8 Optical Power Splitter With an Imbalance of Less Than ±1.0 dB on Silicon-on-Insulator Technology». En: *IEEE Photon. J.* 9 (2017), pág. 6601905.

Capítulo 8

Demultiplexores de Longitud de onda (AWG) integrados en silicio.

Índice

8.1. Diseño Arreglos de redes de guías de onda (AWG) basados en SOI y Si_3N_4. 227

8.1.1. Especificaciones de un AWG. 228

8.1.2. Parámetros clave en un AWG. 228

8.1.3. Diseño, simulaciones y optimización del AWG. 231

8.1.4. Análisis de los parámetros. 239

8.1.5. Respuesta Espectral y Crosstalk. 239

8.1.6. Desplazamiento de λ_C y *Free Spectral Range* (FSR). 251

8.1.7. Resultados experimentales. 252

8.1.8. Diseño de AWGs en Nitruro de Silicio. 261

8.2. Diseño de sistemas basados en anillos resonadores y AWGs integrados en SOI, para la detección de gases en rango espectral NIR. 266

8.2.1. Diseño de Anillos resonadores CROW basados en SOI. 267

8.2.2. Moduladores de micro-anillo 269

8.2.3. Diseño de un CROW con desfasador térmico. 271

8.2.4. Introducción a los espectrómetros fotónicos integrados 277

8.2.5. Diseño de espectrómetros con bajo *crosstalk* basados en AWGs y filtros de anillos resonadores. 281

8.1. Diseño Arreglos de redes de guías de onda (AWG) basados en SOI y Si_3N_4.

Los AWG son dispositivos ópticos integrados pasivos que normalmente se utilizan como multiplexores/demultiplexores de longitud de onda, comúnmente denominados *Arrayed Waveguide Gratings-AWG*. El diseño de estos dispositivos se basa en una serie de guías de ondas con propiedades tanto de imagen como de dispersión. Los AWGs se pueden usar para multiplexar múltiples canales de diferentes longitudes de onda en una sola fibra óptica en el transmisor y también se pueden usar para demultiplexarlos nuevamente en sus canales individuales de diferentes longitudes de onda en el receptor. Comúnmente tienen aplicaciones en el campo de las comunicaciones ópticas, pero también en otras áreas de aplicación, como el procesamiento de señales, la detección industrial y exploración espacial. Debido a una creciente necesidad de desarrollar sensores compactos capaces de adquirir detecciones biológicas y ambientales, la detección óptica y espectroscópica son los enfoques más prometedores para satisfacer los requisitos de este tipo de sensores.

En esta sección, se propone una metodología útil para diseñar AWGs mediante el estudio de sus parámetros clave, lo que nos permite optimizar características específicas en su respuesta espectral así como también de su tamaño. Se presenta un simple pero comprensivo y completo modelo de campo de un AWG de 1x8 canales, basado en óptica de Fourier para el análisis y procesamiento de señales ópticas, pero al mismo tiempo el método es adecuado para calcular parámetros relevantes como: enfoque, dispersión, *Free Spectral Range* (FSR), diafonía (*cross-talk*), pérdidas por inserción, desplazamiento de longitud de onda central, ruido de fondo, entre otros. Entonces, elaboramos un modelo computacional que presenta un procedimiento útil, y que además considera las limitaciones de resolución física propias del dispositivo por procesos litográficos. Luego, mediante sucesivas simulaciones numéricas basadas en Auto-Modos (MODE), Diferencia Finita en el Dominio del Tiempo (FDTD) y Matriz de funciones de transferencia (INTERCONNECT), se valida la metodología empleada optimizando de esta manera el diseño del AWG dependiendo de los requerimientos del usuario. La relación entre la respuesta espectral transmitida y la optimización de los parámetros fueron

estudiadas.

Secciones más adelante, se presenta la implementación de este dispositivo pasivo, en sistemas de detección de gases en el infrarrojo cercano, integrados en sensores compactos con la plataforma tecnológica del SOI.

8.1.1. Especificaciones de un AWG.

El diseño de AWGs se especifica por las siguientes características:

- Número de canales N.
- Longitud de onda central f_c (en frecuencia) o λ_c (en longitud de onda) y el espacio del canal Δf_{ch} o $\Delta\lambda_{ch}$ respectivamente.
- Δf_L (en frecuencia) o $\Delta\lambda_L$ (en longitud de onda) del ancho de banda del canal L-dB.
- Rango espectral libre Δf_{FSR} (en frecuencia) o $\Delta\lambda_{FSR}$ (en longitud de onda).
- Máxima pérdidas de inserción L_o en el canal central de salida.
- No-uniformidad L_u máxima entre canales de salida.
- Máximo nivel de diafonía o *crosstalk*.

8.1.2. Parámetros clave en un AWG.

Los AWGs tienen muchos grados de libertad, además es posible realizar muchas aproximaciones desde el punto de vista del diseño. A continuación, se van detallar paso a paso, los cálculos realizados de los parámetros más relevantes para los diseños llevados a cabo en el proceso de la demultiplexación. La mayoría de estos parámetros fueron introducidos en secciones anteriores, como se pueden observar en las Figuras 3.17 y 3.19. Además, en esta sección se introducirán otros parámetros relevantes al momento de diseñar un AWG.

- Largo R_a de la Región de Propagación Libre FPR: A partir del máximo exceso de pérdida aceptable para el canal externo (No-uniformidad L_u), determinamos el ángulo de dispersión aceptable θ_{max} usando las ecuaciones 3.53 y 3.54. Entonces, la longitud mínima R_a de la región de propagación libre d(FPR) se obtiene como:

$$R_a = s_{max}/\theta_{max}, \tag{8.1}$$

s_{max} es la coordenada s del receptor externo (ver Figura 3.19).

$$\theta_{\max} = \sqrt{8{,}7 \cdot L_u} \cdot \theta_0 \tag{8.2}$$

$$s_{\max} = \frac{N_{\text{array}}}{2} \cdot d_a \tag{8.3}$$

donde θ_0 es el ancho del campo lejano gaussiano equivalente (definido en la ec. 3.53) y d_a es la distancia entre las guías de onda del *array*.

- Incremento del camino óptico ΔL: Primero computamos la dispersión requerida del *array* a partir de $D = ds/df = d_r/\Delta f_{ch}$ (ver ec. 3.48). La separación de las guías de onda d_a en la apertura del conjunto de *arrays* debe elegirse lo más pequeña posible, sino se toma en cuenta esta consideración, una separación grande provocará altas pérdidas de acoplamiento de la región de propagación libre (FPR) hacia el conjunto de *arrays* y viceversa. Con d_a y R_a fijos, el ángulo de divergencia $\Delta\alpha$ es fijo (Ver Figura 3.19), y el incremento de ΔL se deriva de la ec. 3.48 y queda definida como la ec.3.46:

$$\Delta L = m\frac{\lambda_c}{n_{eff_w}}$$

donde n_{eff_w} es el índice efectivo en las guías de onda, λ_c la longitud de onda central y m es un número entero que determina el orden del AWG.

- Separación entre canales de salida d_r: Comenzamos con la especificación del *crosstalk* o diafonía, que pone un límite inferior al espaciado de las guías de onda del receptor d_r. La forma de computarlo viene dada por la siguiente expresión:

$$dr = \frac{df \cdot \lambda_c}{c \cdot \left(\frac{n_g}{n_{eff_s}} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta\alpha}\right)} \tag{8.4}$$

con df:

$$df = \frac{c}{\lambda_c^2} \cdot \Delta\lambda \tag{8.5}$$

donde n_{eff_s} es el índice efectivo de las regiones de propagación libre 1 y 2 (FPR_1 y FPR_2) y $\Delta\alpha$ es el ángulo de divergencia que se forma entre las guías

de onda del *array* en las secciones de entrada y salida:

$$\Delta\alpha = \frac{d_a}{R_a} \tag{8.6}$$

- Ancho de apertura θ_a: El ancho medio angular θ_a de la apertura del *array*, debe determinarse utilizando un gráfico como el de la Figura 3.22(b) (adaptándolo para la estructura de guía de onda específica a utilizar).
- Número de guías de onda N_a: La elección de θ_a fija el número de guías de onda del *array*: $N_a = 2\theta_a R_a/d_a + 1$.
- Rango espectral libre: El *Free Spectral Range* (FSR) en un AWG, es una característica que describe el rango de longitud de onda o de frecuencia entre dos órdenes consecutivos que se enfocan en la misma posición de salida. Con los parámetros computados anteriormente, podemos calcular el FSR en función de λ:

$$FSR_\lambda = \frac{\lambda_c^2}{c \cdot \Delta L} \tag{8.7}$$

donde c es la velocidad de la luz.

Con lo mencionado anteriormente, se completa la determinación de los parámetros geométricos más importantes para diseñar un AWG.

Finalmente, para las guías de ondas del *array* se pueden aplicar diferentes formas para realizar el incremento de longitud ΔL. Takahashi y colaboradores [1], utilizaron la geometría como se muestra en la Figura 8.1(a), que es muy simple desde el punto de vista del diseño, con un radio R constante para todos los brazos del *array* de guías de onda. Smit [2] y Dragone [3] aplicaron la geometría de la Figura 8.1(b), que contiene un número mínimo de uniones de guía de ondas, variando el radio R de todos los brazos del *array* de las guías de onda. Esto es especialmente importante en guías de ondas de semiconductores donde las pérdidas en las uniones y la conversión de modo en las uniones pueden degradar el rendimiento del AWG.

En este trabajo utilizamos el enfoque del diseño basado en la geometría de radio R constante de Takahashi.

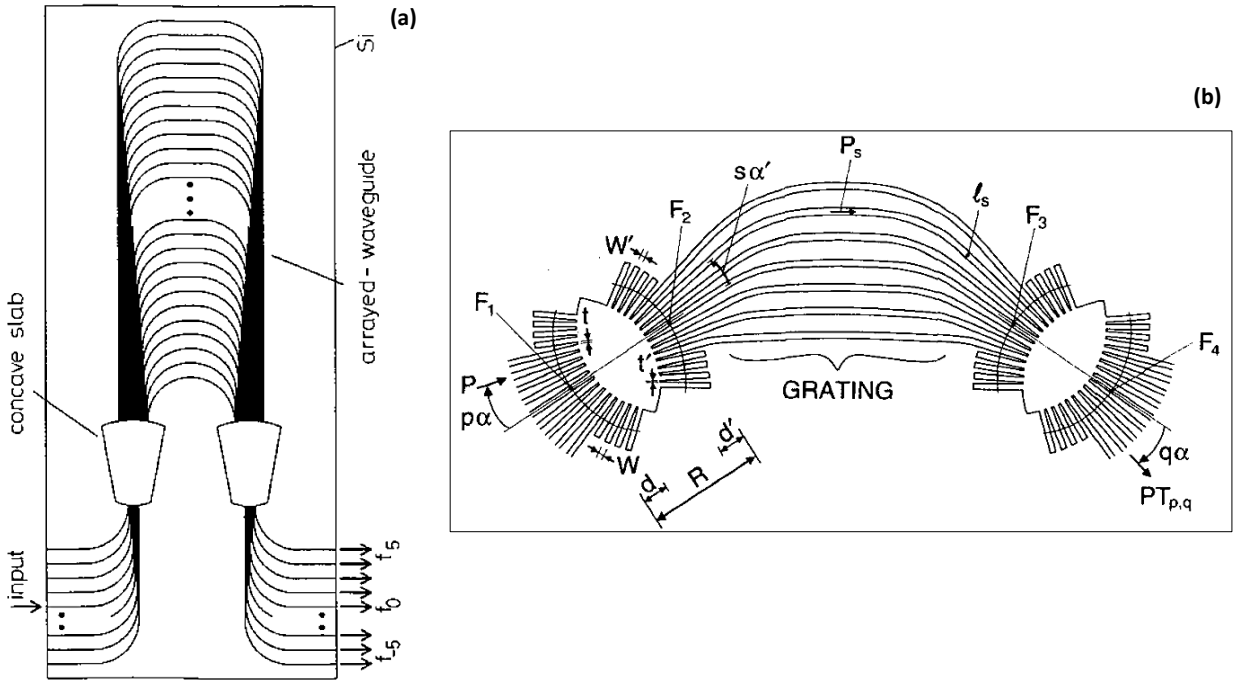


Figura 8.1: Geometrías para la construcción de los radios de las guías de onda del *array*. (a) Geometría con radio R constante y (b) Geometría con radio R variante. Adaptado de Takashi [1] y Dragone [3] respectivamente.

8.1.3. Diseño, simulaciones y optimización del AWG.

El diseño de un AWG típicamente requiere combinaciones de herramientas de simulación, así como modelos analíticos. Comenzamos la herramienta numérica *Lumerical MODE* para calcular las propiedades modales de una guía de onda individual y de la región de propagación libre (FPR). Esto es seguido por simulaciones *2.5-FDTD* para caracterizar más a fondo las propiedades del haz que se difracta cuando entra en la FPR desde una guía de onda. Los parámetros extraídos de estas simulaciones, así como los obtenidos analíticamente, se utilizan en las simulaciones *INTERCONNECT* subsecuentes, basadas en un modelo compacto simplificado y en simulaciones a nivel de componentes más realistas en 2.5-FDTD. Estos métodos numéricos fueron introducidos en la sección 3.2

Vamos a desarrollar dos tipos de AWGs. Para el primero, la estructura de la guía de onda que vamos a implementar es del tipo RIB, y la plataforma tecnológica es Silicio Sobre Aislante (SOI). Para el segundo, el tipo de guía de onda es *strip* y la para la plataforma tecnológica es la del Nitruro de Silicio (Si_3N_4).

Empezamos el diseño de de AWGs bajo el régimen SOI. Las dimensiones de la guía de onda monomodo son las de la Figura 8.2

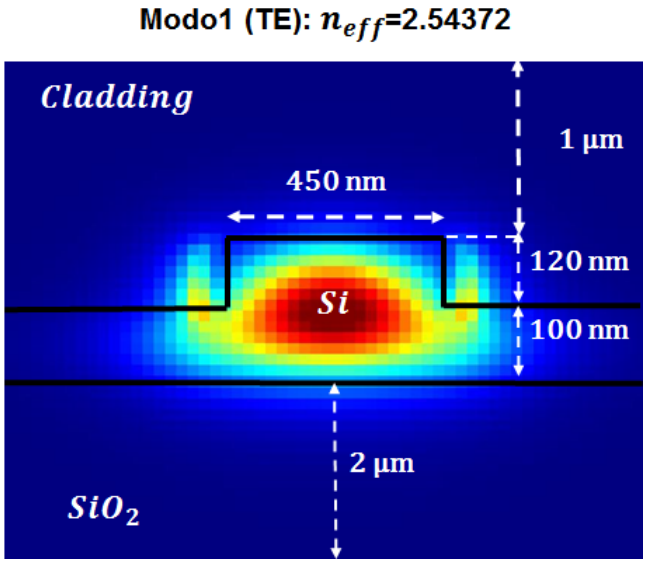


Figura 8.2: Estructura de la guía de onda monomodo para la plataforma SOI.

Se eligieron estas dimensiones debido a que la *foundrie* Cornestone con lo que hemos colaborado, ofrece procesos de fabricación bajo estas condiciones, y mediante un servicio *Multi-Project-Wafer* (MPW), se enviaron a fabricar AWGs preliminares.

Como en todos los dispositivos de fotónica integrada, el primer paso es calcular los índices efectivos y del grupo en la guía de onda, en este caso, también en las regiones de propagación libre FPR_1 y FPR_2, utilizando la herramienta numérica de auto-modos (MODE). Estos resultados se utilizarán como parámetros de entrada en los próximos pasos para las simulaciones de INTERCONNECT y 2.5-FDTD. De los valores computados, se obtuvieron los indices para el modo fundamental de las guías de onda, además para las regiones FPR_1 y FPR_2: índice efectivo en la guías de onda n_{eff_w}=2.544, índice del grupo en la guía de onda n_{g_w}=3.872, índice efectivo en la FPR_1 y FPR_2 es n_{eff_s}=2.840 y índice del grupo en la FPR_1 y FPR_2 es n_{g_s}=3.724.

Luego, para estudiar las regiones del acoplador de entrada (lugar entre la FPR_1 y entrada de las guías de onda del*array*), mediante un modelo simplificado en 2.5-FDTD, se obtuvieron las propiedades de difracción de los modos de guía de onda en la región de propagación libre 1 (FPR_1). En esta etapa, se encuentra la distribución de amplitud del campo eléctrico en función del ángulo θ, como se muestra en la Figura 8.3. De esta imagen, se puede observar que la amplitud del campo no tiene cambios significativos frente a distintas longitudes de onda centrales, por lo que seleccionamos λ_c=1550 nm para continuar con el desarrollo del AWG.

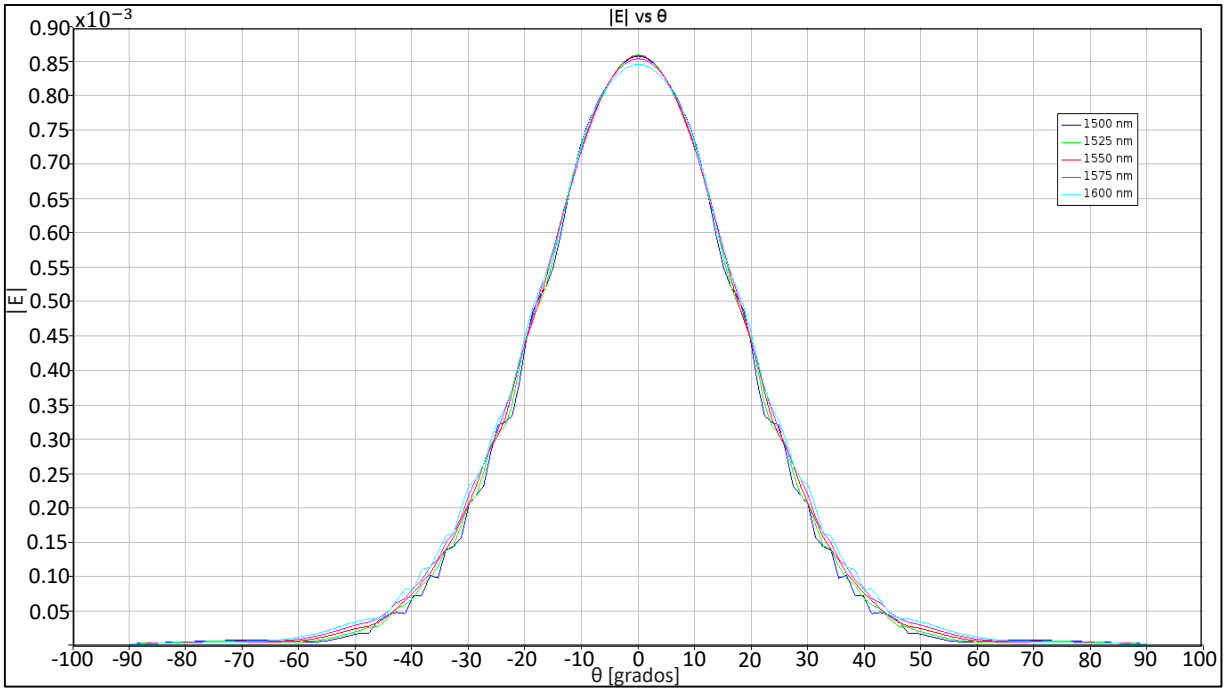


Figura 8.3: Variación de la amplitud del campo |E| vs el ángulo θ para diferentes longitudes de onda.

La distribución de amplitud en función de θ, también se utiliza como un parámetro de entrada en INTERCONNECT. Además, se pueden hacer simulaciones rápidas con la posibilidad de variar ciertos parámetros como: la cantidad de canales de salida $\mathrm{N}_{channels}$, número de arrays N_{array} y la separación entre ellos d_a, longitud de onda central λ_c, orden m del AWG (longitud de ΔL de los N_{array}), ancho de las guías w, entre otros. Esto nos permite tener una visión rápida de la respuesta espectral del AWG ante variaciones de parámetros claves y sensibles.

Bajo este método rápido, en el acoplador de entrada, la amplitud del campo E en la entrada de cada guía de onda dispuesta de los N_{array}, se calcula utilizando E vs θ obtenidos en la Figura 8.3. El acoplamiento se estima mediante el ancho de la guía de onda y una fracción de aceptación de la guía de onda. La luz se propaga a través del conjunto de las guías de onda utilizando los valores de n_{eff_w} y n_{g_w} encontrados previamente, y la pérdida estimada en las guías es de $\approx$ 1 dB/cm. En el acoplador de salida (lugar entre las salidas de las guías de onda del *array* y la FPR_2), se calcula la suma coherente de las contribuciones de todas las guías de onda de los N_{array} a las guías de onda de salida, nuevamente utilizando E vs θ. La fase se calcula en función de la distancia de propagación. Los resultados se suavizan en función del ancho de entrada fino de la guía de onda.

La Figura 8.4 muestra la respuesta espectral de un AWG 1x8 en la plataforma SOI con el método rápido (INTERCONNECT). Se hizo un barrido en longitud

de onda λ desde 1500 nm a 1600 nm con una longitud de onda central λ_c=1550 nm. Cada color en la respuesta espectral, se corresponde a la salida de un canal en el AWG 1x8, los canales están separados espectralmente cada 2 nm. Además, se puede observar varios lóbulos envolventes, cada uno con ocho salidas, esto sucede porque el AWG tiene distintos ordenes espectrales de demultiplexación, lo que significa que a medida que vamos barriendo λ en la entrada del AWG, por un mismo canal de salida puede aparecer mas de un λ con cierta separación espectral, a la cual denominamos *Free Spectral Range* (FSR) del AWG. Por ejemplo, si observamos λ_1=1512, λ_2=1531.5, λ_3=1551, λ_4=1571 y λ_5=1590.5, todas se corresponden al canal central de color magenta, lo que significa que estas 5 longitudes de onda, van a ser demultiplexadas a través del mismo canal y están separadas con un FSR≈20 nm.

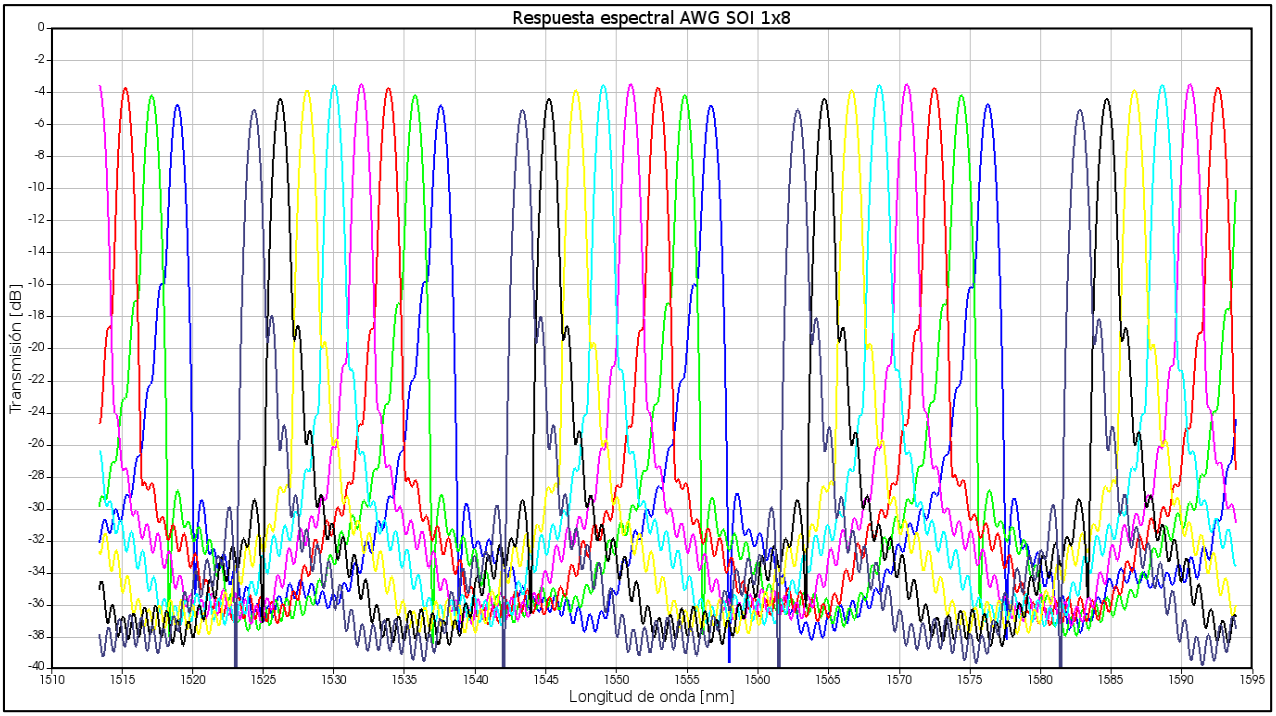


Figura 8.4: Respuesta espectral del AWG 1x8 en la plataforma SOI con el método rápido.

Después de observar el comportamiento de la respuesta espectral con el método rápido descrito, se procede hacer un análisis más realista del rendimiento del AWG, para ello utilizamos simulaciones 2.5FDTD en dos etapas, una por cada región de propagación libre 1 y 2.

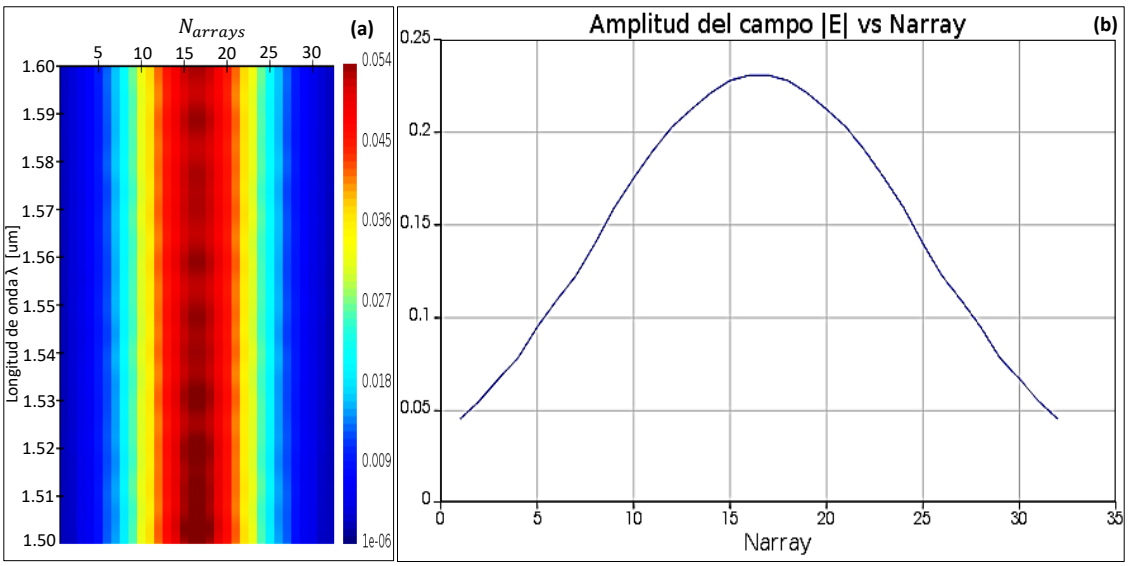


Figura 8.5: Acoplador de entrada: (a) N_{arrays} vs λ. (b) Amplitud $|E|$ vs N_{arrays}.

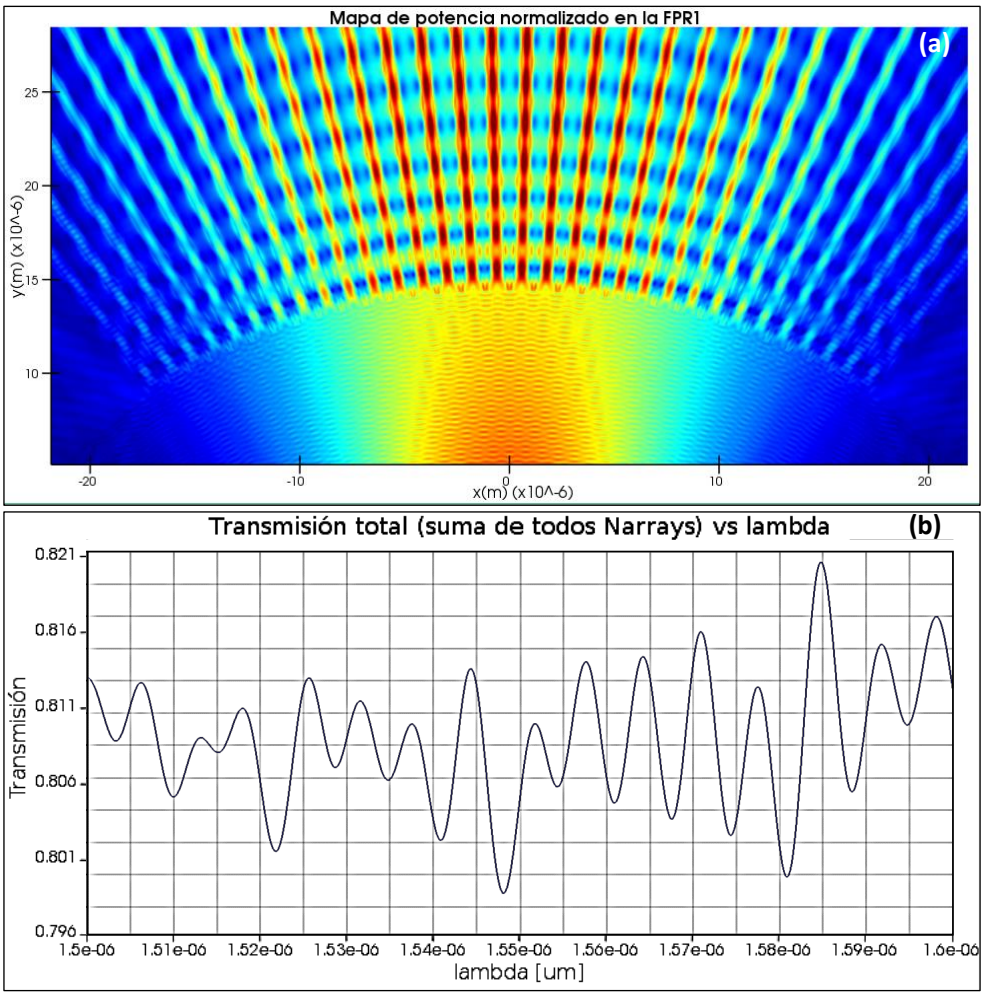


Figura 8.6: Acoplador de entrada. (a) Mapa de potencia normalizado del en la región de propagación libre 1. (b) Transmisión vs λ.

Empezamos este análisis en la región de propagación libre 1 (FPR_1). El resultado de la Figura 8.5(a), muestra la transmisión en cada una de las guías de ondas de los N_{array} haciendo un barrido en λ de 1500 nm a 1600 nm. Como era de esperar, tenemos la máxima transmisión en las guías de ondas centrales. Además, se puede observar que el funcionamiento es muy fluido, lo que significa que el acoplador de entrada esta optimizado. Para lograrlo, se han adaptado *linear tapers* (ver Figura 8.7) para mejorar el rendimiento, de esta manera se reducen las interferencias de onda de luz reflejada dentro del sistema óptico, que pueden causar resonancias indeseadas (efecto Fabry-Perot [4]) y dañar la calidad de la señal óptica. Sin esta adaptación, observaríamos fluctuaciones pronunciadas y de más bajo nivel en la transmisión, en consecuencia el desempeño del AWG no tendría un buen rendimiento. Para el diseño de los *linear tapers*, se eligió un ancho de entrada w_1=0.9 μm y ancho de salida w_2= 0.45 μm, este último coincide con el ancho de las guías de ondas del *array*. Es importante mencionar, que se podría seguir incrementando el ancho w_1, esto permitiría reducir aún más el efecto Fabry-Perot en el acoplar de entrada, pero esto no es posible debido a la resolución litográfica permitida por el fabricante. La separación mínima entre las guías de onda debe tener un GAP superior a 0.25 μm (Figura 8.7(a)), de lo contrario se violarían las reglas de diseño del fabricante. De todas maneras, se programa una alerta en el software para evitar este tipo de errores en el diseño. Por último, en la Figura 8.8, mediante simulaciones del tipo EME (propagador de modos), se encontró que el largo óptimo (mínima longitud L del camino óptico con una máxima transmisión) para el *linear taper* es L = 7.5 μm, con w_1 y w_2 fijos, los cuales fueron previamente establecidos.

La Figura 8.5(b), muestra la amplitud resultante que se calcula promediando la amplitud en todas las longitudes de onda que recibe cada N guía de onda del conjunto de *arrays* en el acoplador de entrada.

En la Figura 8.6(a), se muestra la distribución del campo E a lo largo de la primera etapa del AWG, que vas desde la guía de onda de entrada (máxima potencia), atraviesa la región de propagación libre 1 (FPR_1), y finalmente la luz se acopla en cada una de las N guías de onda del acoplador de entrada.

Finalmente, los resultados de la trasmisión de la Figura 8.6(b) muestran la transmisión total sumando el aporte de todas las guías de ondas (Narray) en función de la longitud de onda, las cuales son oscilantes como era de esperarse, además se observa que la variación de la transmisión no es muy diferente para cada una de ellas, van desde 0.80 a 0.82.

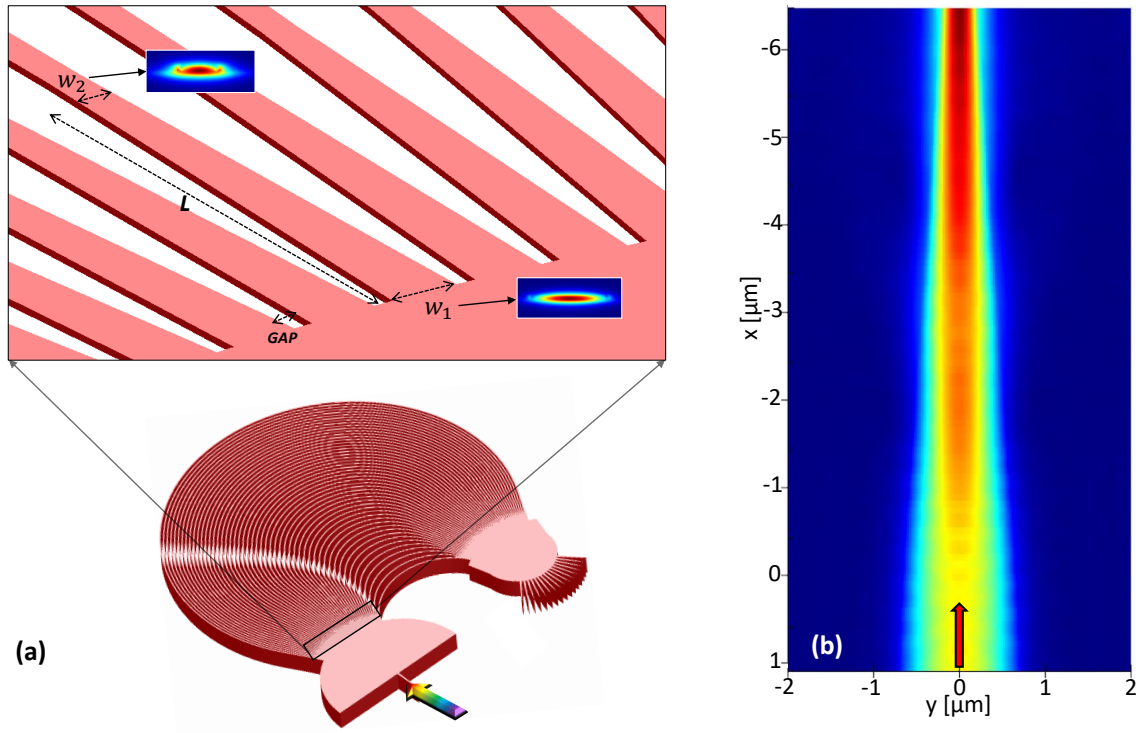


Figura 8.7: *Liner tapers* en los acopladores de entrada. (a) Diseño del AWG desarrollado y zoom en los acopladores de entrada en donde se detallan los parámetros de los *linear tapers*. (b) Mapa de potencia del *linear taper*, el campo E ingresa por w_1 y se confina de manera suave hasta llegar a w_2

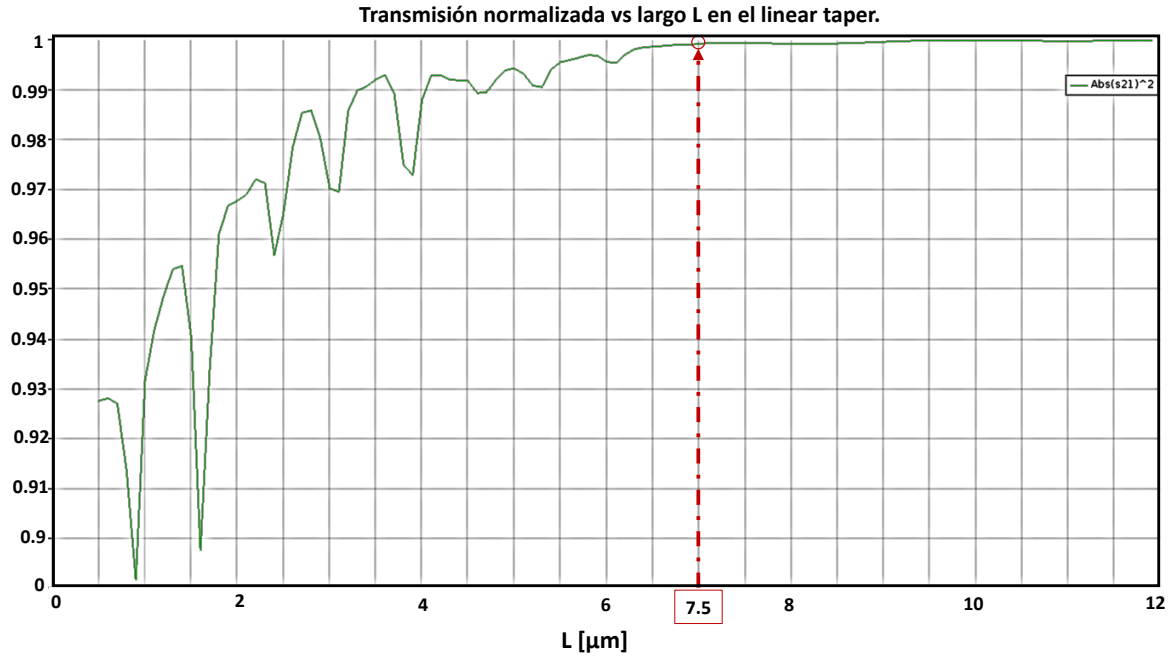


Figura 8.8: Optimización del largo del *linear taper*. El largo L se eligió en base a la menor longitud posible teniendo en cuenta la mejor transmisión óptica.

Ahora, hacemos un análisis en la región de propagación libre 2 (FPR_2). Como las guías de onda tienen un índice efectivo (n_{eff_w}) diferente al índice efectivo de las regiones de propagación libre 1 y 2 (n_{eff_s}), entonces la luz que se propaga en cada una de las guías de los N_{arrays}, al ingresar a la FPR_2 experimentan refracción, cambiando así su dirección. La cantidad de ángulo refractado dependerá de su longitud de onda asociada.

Entonces, en esta segunda etapa se incluye el efecto de la Transmisión vs. λ de la primera etapa. Cada uno de los espectros que fueron tomados por cada uno de los N_{arrays} del acoplador de entrada, se usan como fuentes de entrada dispuestas en el círculo de Rowland para la (FPR_2). Como ejemplo, utilizamos 32 fuentes de guías de ondas diferentes (N_{array}=32). Los pulsos de fuente utilizados en cada guía de onda se compensarán precisamente por la diferencia de retardo de grupo deseado en cada guía de onda, que esta dado por

$$\Delta t = \Delta L \frac{n_g}{c} \tag{8.8}$$

donde ΔL es la diferencia de longitud de las guías de onda de los *arrays*. Esto da como resultado la diferencia de retardo del grupo objetivo en cada guía de onda.

En resumen, para cada longitud de onda λ_n, los campos que se propagan en cada una las guías de onda de los N_{array} van a llegar a las aperturas de salida con la misma fase, así mismo la distribución de campo en la apertura de entrada se reproducirá en la apertura de salida. Por lo tanto, el haz divergente en la apertura de entrada (en la FPR_1) se transforma en uno convergente con igual amplitud y distribución de fase. Esto, gracias al adecuado montaje de las guías de onda de los N_{arrays} sobre el círculo de Rowland, lo que permite que los múltiples haces de luz interfieren constructivamente y convergen en un solo punto focal, que es el centro del acoplador de salida (en la FPR_2).

En la Figura 8.9, se muestran los resultados de las simulaciones FDTD en la región de propagación libre 2 y también de los canales de salida internos (4, 5) y externos (1,8) del AWG. Por ejemplo, en el canal 5 se puede observar como el campo E de una longitud de onda λ_n ingresa a este canal de salida, y además se puede apreciar como parte de este campo se acopla en un canal vecino (*crosstalk*), este defecto de la demultiplexación en un AWG será analizado en la siguiente sección.

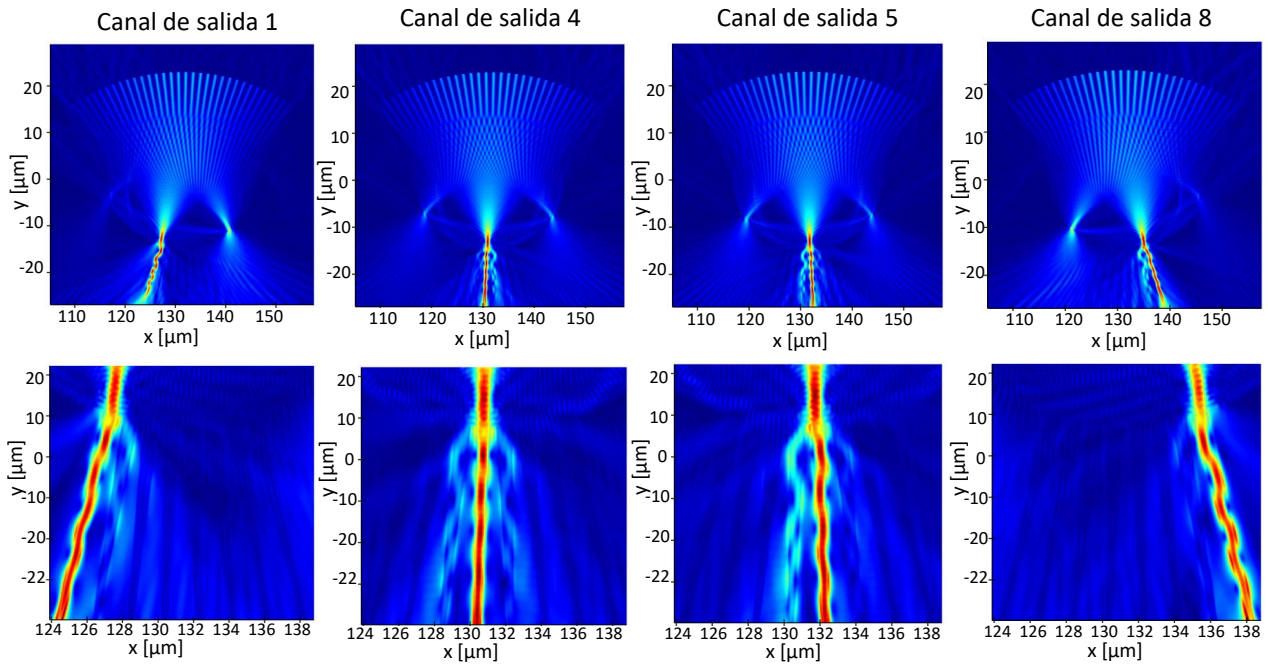


Figura 8.9: Simulaciones FDTD en la FPR_2. Por simplicidad, se muestra el campo E en los canales externos (1 y 8) e internos (4 y 5) para el AWG 1x8. Las imágenes de arriba corresponden al campo E en toda la FPR_2, las imágenes de abajo representan una ampliación zoom de los receptores de salida en la FPR_2.

8.1.4. Análisis de los parámetros.

En esta sección se va a realizar un análisis en el rendimiento espectral del AWG respecto de ciertos parámetros sensibles, haciendo foco en la diafonía (*crosstalk*) del AWG, debido a que es la característica más relevante en estos tipos de dispositivos.

El *crosstalk* en un AWG se mide para evaluar cómo la señal destinada a un canal específico se ve interferida por las señales de otros canales. Las formas comunes de medir el *crosstalk* incluyen:

Crosstalk entre canales adyacentes: Esta medida evalúa cuánto de la señal de un canal se acopla en los canales inmediatamente vecinos.

Crosstalk global (o total): Esta medida evalúa cuánto de la señal de un canal se acopla en todos los otros canales, no solo en los adyacentes.

8.1.5. Respuesta Espectral y Crosstalk.

Entonces, vamos a considerar la diferencia en longitud del camino óptico de las guías de onda adyacentes y el índice de refracción efectivo del *array*: ΔL y n_e, respectivamente. Las fluctuaciones de n_e y ΔL deteriorarán el *crosstalk* del

AWG. Para analizar esta influencia, la respuesta espectral puede expresarse como una función de transferencia simple [5], en donde el campo en la salida 1, que se encuentra en el ángulo θ_1 y está dado por:

$$E_1 = \sum_{j=1}^{n} f_j g_j \exp\left(\frac{i2\pi n_e j s}{\lambda}\right) \tag{8.9}$$

donde n es el número de guías de onda en el arreglo y f_j, g_j son los coeficientes de acoplamiento de campo desde la guía de entrada hasta la guía de onda j del arreglo y desde la guía de onda j del arreglo hasta la guía de salida 1. Se ha omitido el factor de fase común asociado con la longitud de las guías de onda del arreglo. Al omitir este factor común, se simplifican los cálculos porque esta fase común no afecta la diferencia relativa de fase entre las diferentes guías de onda del arreglo. Lo que realmente importa para el análisis del funcionamiento del arreglo (por ejemplo la interferencia y la respuesta espectral) son las diferencias de fase entre las guías de onda, no la fase absoluta. Las magnitudes de f_j y g_j son casi las mismas y proporcionales a la amplitud del campo al entrar en el arreglo. Asumiendo que los coeficientes de acoplamiento tienen fases asociadas con las trayectorias de fase circular que se propagan desde las guías de onda de entrada y salida y omitiendo los factores de fase comunes, tomaremos f_j como real y:

$$g_j = f_j \exp\left(\frac{i2\pi n_e j a \theta_1}{\lambda}\right). \tag{8.10}$$

$$E_1 = \sum_{j=1}^{n} f_j^2 \exp\left(\frac{ij2\pi n_e (s + a\theta_1)}{\lambda}\right) \tag{8.11}$$

Es importante distribuir el número limitado de guías de onda del arreglo para interceptar la mayor parte de la potencia emitida desde la guía de entrada.

Análisis del *Crosstalk* variando el ancho w en las guías.

Para este análisis, utilizamos una estructura de 220nm de espesor como guía de onda de silicio, sobre una capa de 2 μm de dióxido de silicio, luego realizamos las simulaciones del AWG. A partir de la ecuación 8.11 (Respuesta espectral) analizamos los efectos del *crosstalk* a partir de las variaciones del ancho de la guía. Además se considera la medida de *croostalk* total o global. El comportamiento observado puede parecer contra-intuitivo a primera vista (uno pensaría que a mayor ancho en la guía, mayor probabilidad de acoplamiento de los canales vecinos), pero hay varias razones por las cuales el aumento del ancho de la guía

de onda puede ayudar a reducir el *crosstalk* global en AWGs. Al variar el ancho de las guías de onda, resultan en variaciones en el índice n_e. En la figura 8.10(a) se muestran la relación entre el *crosstalk* y el ancho de las guías en el arreglo. En donde se puede observar que el *crosstalk* disminuye a medida que aumenta el ancho de las guías, es decir que guías de onda más anchas pueden restringir mejor el *crosstalk* global. Una consideración a tomar en cuenta, es que existen fluctuaciones indeseadas de unos pocos nanómetros (10 a 20 nm comúnmente) en el ancho de las guías de onda, que pueden introducirse en la fabricación durante el proceso de grabado (*etching*), lo que provoca un aumento en el *crosstalk*, siendo menos severo en guías de onda más anchas.

Las guías de onda más anchas tienden a ser menos sensibles a las pequeñas fluctuaciones en su ancho debido a las imperfecciones en el proceso de fabricación.

En guías de onda más anchas, el modo de propagación está mejor confinado dentro de la guía de onda. Esto reduce el acoplamiento no deseado de la señal entre guías adyacentes.

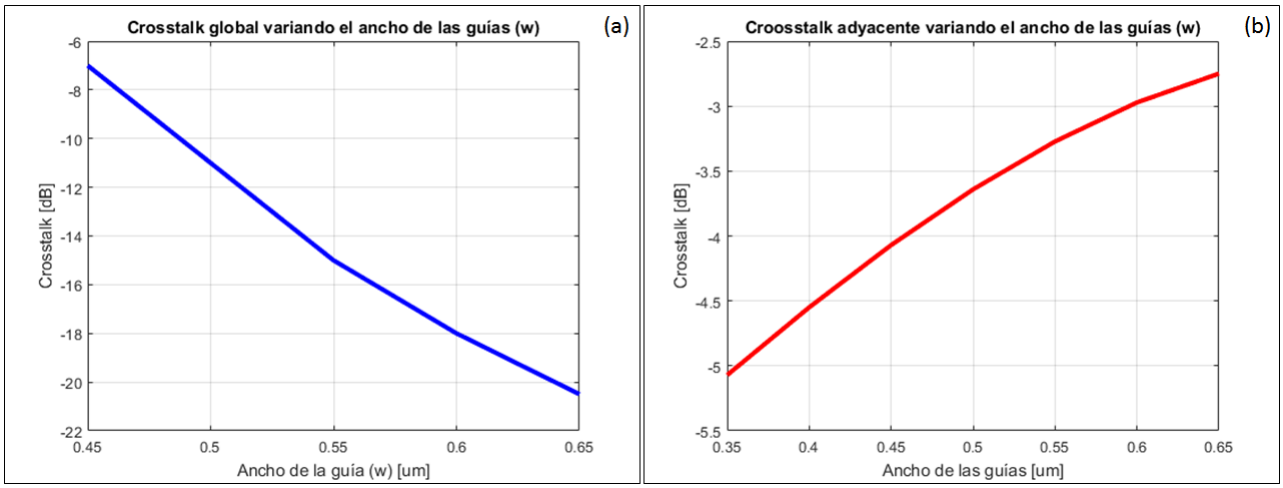


Figura 8.10: (a) *Croostalk* global variando el ancho w de las guías de onda. (b) *Crosstalk* considerando el canal vecino, variando el ancho w de las guías de onda.

Las fluctuaciones en el ancho de la guía de onda pueden causar un desplazamiento en la longitud de onda central de los canales en un AWG. Este desplazamiento se traduce en una mala alineación de los canales, y en consecuencia, en un aumento del *crosstalk*. Las guías de onda más anchas reducen este desplazamiento, ya que la variabilidad en el índice efectivo es menor.

En el análisis anterior se consideró el *crosstalk* global Figura 8.10(a), que es el valor comúnmente reportado por los fabricantes y en distintos artículos en el campo de las comunicaciones ópticas. Este *crosstalk* global mide cuánta señal, destinada a un solo canal, se acopla en los demás canales del AWG. Para calcularlo,

se suman las contribuciones de *crosstalk* de todos los canales interferidos y luego se promedia.

En algunos casos, se utiliza como medida de interferencia el *crosstalk* del canal vecino o adyacente. Vamos a realizar un análisis similar al anterior, pero enfocado en el *crosstalk* vecino, que mide la potencia de la señal acoplada en los canales inmediatamente adyacentes al canal central. Este tipo de análisis es importante porque, en el desarrollo de sensores espectroscópicos (se introducirán secciones más adelante), nos interesa más el *crosstalk* vecino que el *crosstalk* global.

Cuando se mide el *crosstalk* de los canales vecinos, el efecto de las superposición de modos es más significativo. En guías de onda más anchas, los modos ópticos pueden tener una mayor extensión lateral, lo que aumenta la superposición con los modos de los canales adyacentes, en consecuencia aumenta el *crosstalk* entre canales vecinos, como se muestra en la Figura 8.10(b). Para cada ancho de guía simulado, se midió el pico máximo de transmisión del canal central y se restó el valor máximo acoplado de su canal vecino inmediato. Para este análisis se fijaron: el espaciado espectral en $\Delta\lambda$ =2 nm, la cantidad de N_{arrays}=32, el orden del AWG en m=36, la distancia entre *arrays* d_a=1 μm, mantenemos el resto de parámetros iguales.

Análisis del *Crosstalk* variando el espaciado $\Delta\lambda$ entre canales.

Para este análisis fijamos el ancho de la guía en w =450 nm,la cantidad de N_{arrays}=32, el orden del AWG m=36, la distancia entre *arrays* d_a=1 μm, mantenemos el resto de parámetros iguales y estudiamos con detalle los efectos en el *crosstalk* con diferentes espaciados espectrales entre canales $\Delta\lambda$ (*channel spacing*).

En la Figura 8.11, podemos ver que el *crosstalk* disminuye con el aumento del espaciamiento entre canales $\Delta\lambda$. Las Figuras 8.11(a) y 8.11(b) muestran los espectros simulados de los AWGs en SOI con espaciados de canal desde 1 nm hasta 7 nm. Las diafonías correspondientes de los AWGs son -12 dB hasta -35 dB respectivamente. El *crosstalk* se midió desde 0 dB hasta el punto donde se cruzan los canales (remarcado en un pequeño círculo para cada AWG). La razón es que la influencia en la diafonía está determinada por la fluctuación de n_e multiplicada por ΔL. Cuanto mayor es el espaciamiento entre canales $\Delta\lambda$, menor es el valor de ΔL, y la fluctuación de n_e multiplicada por ΔL es menor. Entonces, los errores de fase correspondientes disminuyen y, como resultado, la diafonía se reduce. Otra razón que es más intuitiva, es que al pedirle al AWG un separación espectral cada

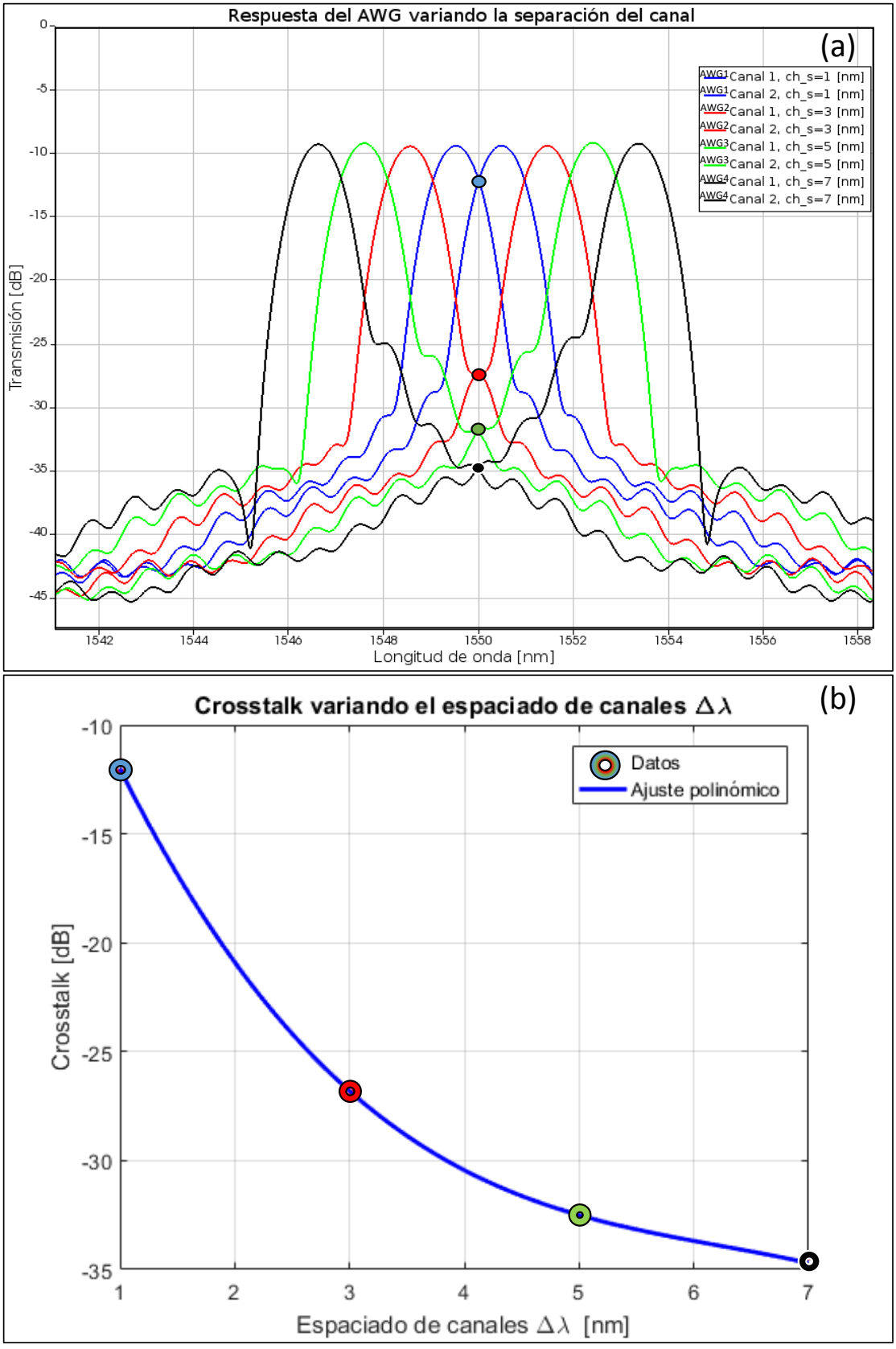


Figura 8.11: (a)Respuesta espectral de 4 AWGs, se conservan los mismos parámetros y se hace un barrido en $\Delta\lambda$. Se muestran solo los dos canales centrales de cada AWG. (b) *Crosstalk* del AWG variando la separación espectral entre canales $\Delta\lambda$.

vez mayor, la separación de los canales de salida (espaciales) también aumenta de manera proporcional, con lo cual el efecto de la superposición de modos es menos significativo.

Análisis del *Crosstalk* variando la cantidad de N_{arrays}.

Para este análisis fijamos un ancho de guía $w = 450$ nm y $\Delta\lambda = 2$ nm, el orden del AWG en m=36, la distancia entre *arrays* d_a=1 μm, mantenemos el resto de parámetros iguales, y estudiamos con detalle los efectos en el *crosstalk* variando la cantidad de N_{arrays}. En la Figura 8.12, se presenta este análisis, en donde se observa que a medida que la cantidad de N_{arrays} aumenta, el *crosstalk* disminuye. La Figura 8.12(a) muestra las respuestas espectrales de varios AWGs en SOI, incrementado la cantidad de guías del *array* (N_{arrays}) desde 20 a 32 guías de onda. La Figura 8.12(b) muestra las diafonías correspondientes de los AWGs que van -13 dB hasta -21 dB respectivamente. El *crosstalk* se midió desde 0 dB hasta el punto donde se cruzan los canales (remarcado en un pequeño círculo para cada AWG). La razón por la cual la cantidad de guías de onda (N_{arrays}) tiene una influencia significativa en el *crosstalk*, es que a medida que aumenta el número de guías de onda, cada guía contribuye con una fase distinta, el patrón de interferencia en la salida se vuelve más definido y la resolución espectral del dispositivo mejora. Con un mayor número de guías de onda, la interferencia constructiva y destructiva entre las guías de onda puede generar la dispersión angular necesaria, para separar las longitudes de onda con mayor precisión, lo que teóricamente debería reducir el *crosstalk*.

Sin embargo, cualquier pequeña variación en la fase (debido a imperfecciones de fabricación o cambios de temperatura) afecta más cuando hay muchas guías de onda, haciendo que el *crosstalk* sea más sensible a estas variaciones. Desde el punto de vista de la micro-fabricación, a medida que se agregan más caminos ópticos, aumenta la probabilidad de afectar la *performance* en la gran mayoría de dispositivos fotónicos.

Una expresión que nos permite relacionar el número de guías de onda del *array* con el *crosstalk* [5] es: $CR \propto 1/N^2$, donde CR es el *crosstalk*.

Esta relación indica que, teóricamente, el *crosstalk* disminuye con el cuadrado del número de guías de onda, asumiendo una distribución de fase perfectamente controlada, pero en la práctica, debido a los errores de fabricación esto no es tan cierto. Por ese motivo es importante encontrar un equilibrio óptimo y considerar cuidadosamente en el diseño y la fabricación del AWG la cantidad de N_{arrays} para minimizar el *crosstalk*.

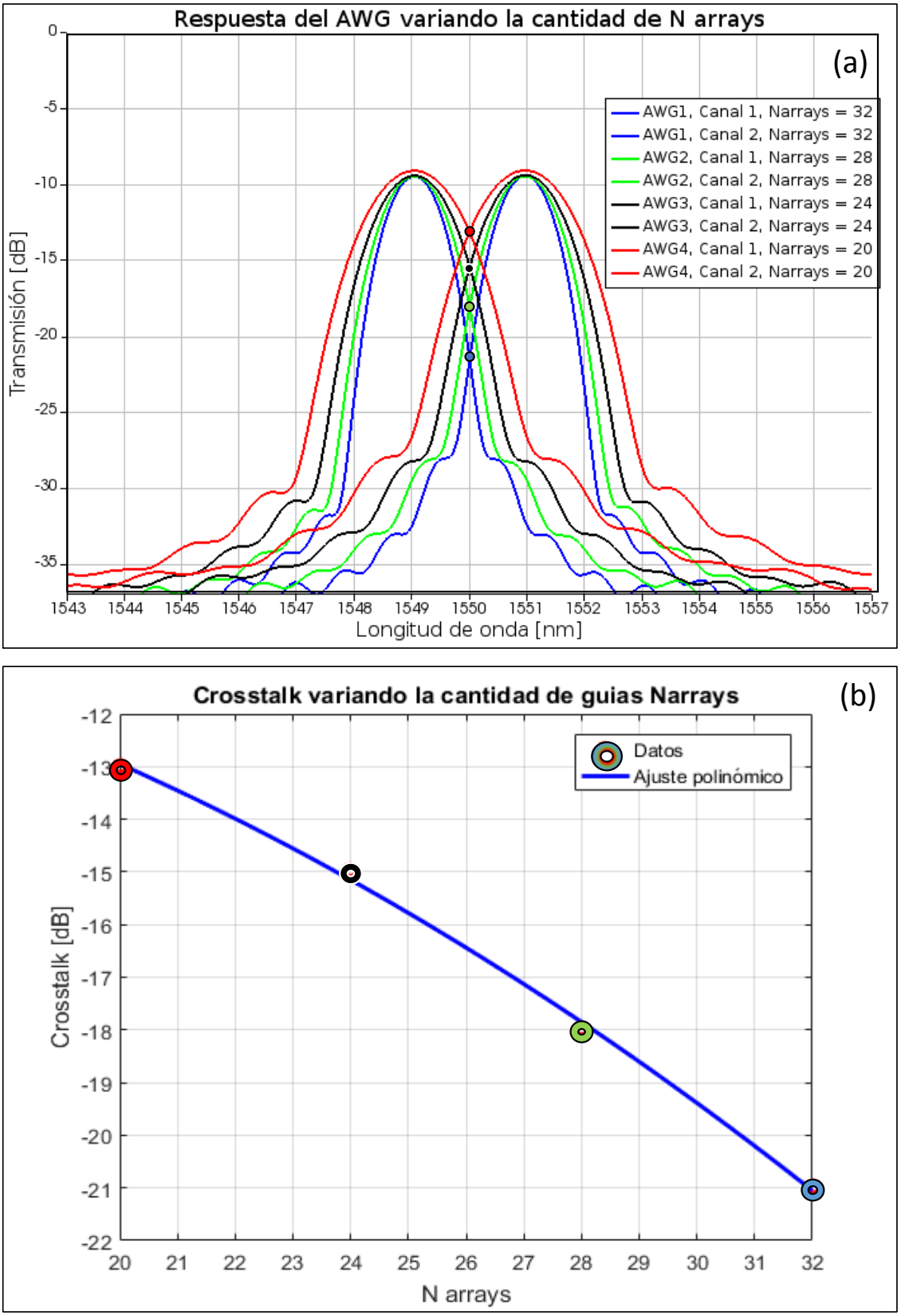


Figura 8.12: (a)Respuesta espectral de 4 AWGs, se conservan los mismos parámetros y se hace un barrido en la cantidad de N_{arrays}. Se muestran solo los dos canales centrales de cada AWG. (b) *Croostalk* del AWG variando la cantidad de N_{arrays}.

Análisis del *Crosstalk* variando el orden m del AWG.

Para este análisis fijamos el ancho de la guía en w =450 nm, el espaciado espectral en $\Delta\lambda$ =2 nm, la cantidad de N_{arrays}=32, la distancia entre *arrays* d_a=1 μm, mantenemos el resto de parámetros iguales, y estudiamos con detalle los efectos en el *crosstalk* variando el orden m (m determina la diferencia de camino óptico entre canales adyacentes) del AWG.

En la Figura 8.13, se presenta este análisis, en donde se observa que a medida que aumenta el orden del AWG, el *crosstalk* disminuye. La Figura 8.13(a) muestra las respuestas espectrales de las simulaciones, incrementado la diferencia de camino óptico al aumentar el orden m del AWG, desde 20 a 32. La Figura 8.13(b) muestra las diafonías correspondientes de los AWGs que van de -16.3 dB hasta -27.7 dB respectivamente. El *crosstalk* se midió desde 0 dB hasta el punto donde se cruzan los canales (remarcado en un pequeño círculo para cada AWG).

Un mayor m generalmente mejora la resolución espectral del AWG, permitiendo una separación más fina de las longitudes de onda demultiplexadas, lo que en un principio disminuye el *crosstalk* como se observa el Figura 8.13(b). Esto se puede interpretar a partir de la diferencia de camino óptico entre guías adyacentes ΔL (ec: 3.46 o 8.12), la fase acumulada ϕ (ec: 8.14) en un guía de longitud L y la diferencia de fase acumulada $\Delta\phi$ (ec: 8.15) entre las guías de onda del *array*.

Diferencia de Camino Óptico:

$$\Delta L = m\frac{\lambda_c}{n_{eff}} \tag{8.12}$$

El número de onda k para una longitud de onda λ es:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{8.13}$$

La Fase Acumulada en una guía del array de largo L es:

$$\phi = k \cdot n_{\text{eff}} \cdot L = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n_{\text{eff}} \cdot L \tag{8.14}$$

La condición de fase constructiva, que se obtiene de simplificar y despejar la fase acumulada $\Delta\phi$, de la ecuación del ángulo de dispersión θ (ec: 3.47):

$$\Delta\phi = k \cdot n_{\text{eff}} \cdot \Delta L = 2 \cdot \pi \cdot m \tag{8.15}$$

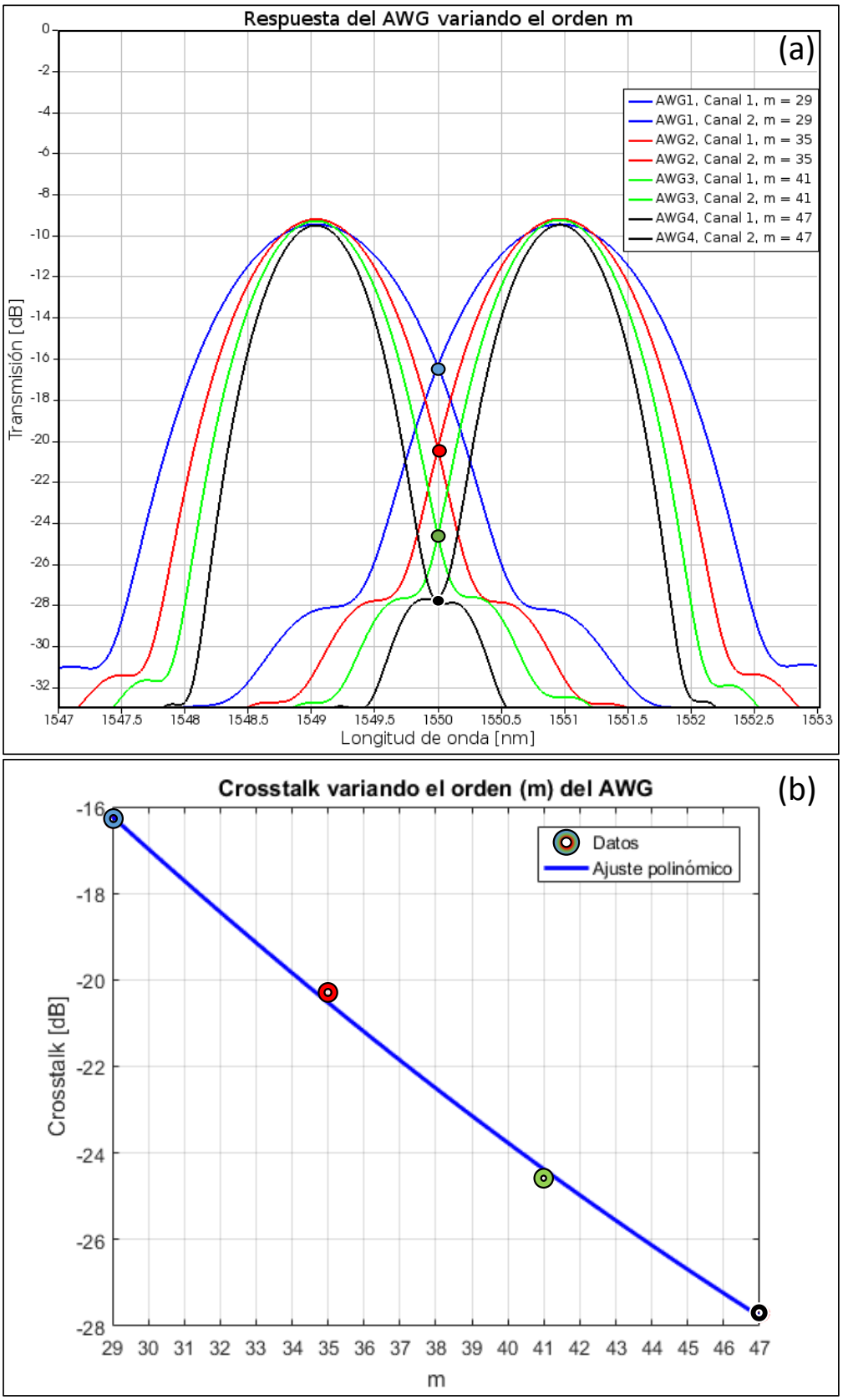


Figura 8.13: (a)Respuesta espectral de 4 AWGs, se conservan los mismos parámetros y se hace un barrido en el orden m del AWG. Se muestran solo los dos canales centrales de cada AWG. (b) *Croostalk* del AWG variando el orden del m del AWG.

Entonces, para que las señales se sumen constructivamente en los puntos focales del AWG, la diferencia de fase acumulada debe ser un múltiplo entero de 2π. Sustituyendo k (8.13) y ΔL (8.12) en la ec. 8.15 se obtiene:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n_{\text{eff}} \cdot \left(m \cdot \frac{\lambda_0}{n_{\text{eff}}} \right) = \frac{2\pi \cdot m \cdot \lambda_0}{\lambda} \tag{8.16}$$

Luego, para que haya interferencia constructiva, $\Delta\phi$ debe ser un múltiplo entero de 2 π:

$$\frac{2\pi \cdot m \cdot \lambda_0}{\lambda} = 2\pi \cdot p \tag{8.17}$$

donde p es un número entero. Simplificando:

$$\frac{m \cdot \lambda_0}{\lambda} = p \tag{8.18}$$

Por lo tanto, un mayor orden m del AWG puede mejorar resolución espectral $\Delta\lambda$, porque la separación entre picos de interferencia es más estrecha. Esto se debe a que la separación de longitud de onda $\Delta\lambda$, es inversamente proporcional al producto de m y el número de guías N_{arrays}.

Resolución Espectral:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_0}{m \cdot N} \tag{8.19}$$

Sin embargo, este aumento puede hacer que el diseño sea más sensible a las imperfecciones de fabricación. El *crosstalk* se ve afectado porque una mayor diferencia de camino óptico puede llevar a una superposición no deseada de picos de interferencia, especialmente si hay variaciones en n_{eff} y ΔL debido a errores de fabricación. Por ese motivo, una vez más, es importante encontrar un equilibrio óptimo y considerar cuidadosamente, entre el diseño y la fabricación del AWG el orden m del AWG para minimizar el *crosstalk*, pues m a modo resumido, incrementa las longitudes en cada una de las guías de onda en el *array*. Por último, otro efecto no deseado al agregar guías de onda cada vez más largas, es que las pérdidas por propagación empiezan a tener relevancia, lo que aumenta las pérdidas generales de todo el sistema.

Análisis del *Crosstalk* variando la distancia d_a entre las guías de onda del *array*.

Para este análisis fijamos el ancho de la guía en w =450 nm, el espaciado espectral en $\Delta\lambda$ =2 nm, la cantidad de N_{arrays}=32, el orden del AWG en m=36, mantenemos el resto de parámetros iguales, y estudiamos con detalle los efectos en el *crosstalk* variando la distancia d_a entre las guías de onda adyacentes en

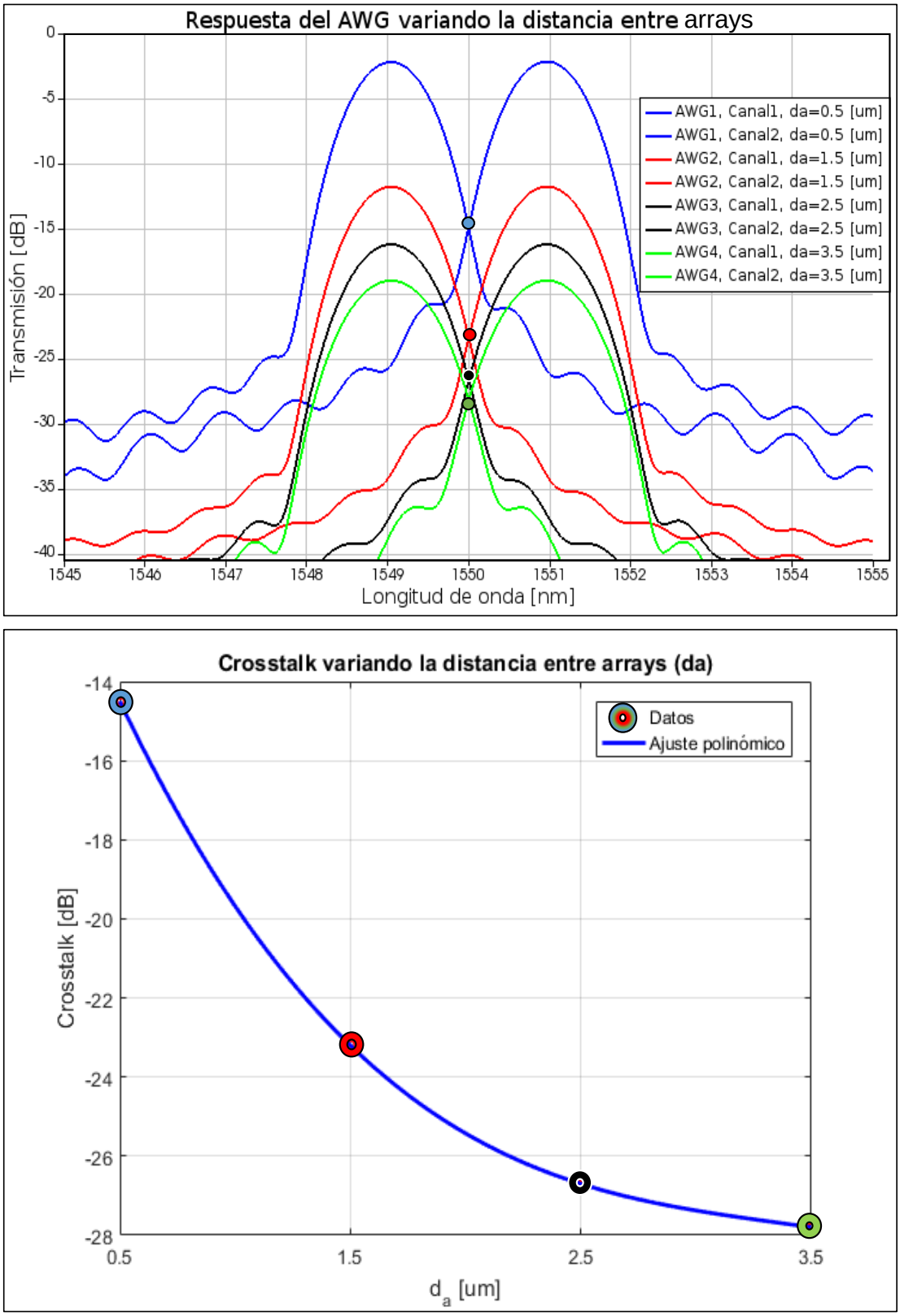


Figura 8.14: (a) Respuesta espectral de 4 AWGs, se conservan los mismos parámetros y se hace un barrido entre las distancia d_a entre las guías de onda vecinas del *array*. Se muestran solo los dos canales centrales de cada AWG. (b) *Croostalk* del AWG variando la distancia d_a entre los N$_a$*rrays* del AWG.

los N_{array}. En la Figura 8.14, se presenta este análisis, en donde se observa que a medida que aumenta la distancia entre *arrays* d_a, el *crosstalk* disminuye. La Figura 8.14(a) muestra las respuestas espectrales correspondiente a simulaciones de varios AWGs en SOI, incrementado la distancia entre *arrays* d_a desde 0.5 μm a 3.5 μm. La Figura 8.14(b) muestra las diafonías correspondientes de los AWGs que van de -14.5 dB hasta -27.8 dB respectivamente. El *crosstalk* se midió desde 0 dB hasta el punto donde se cruzan los canales (remarcado en un pequeño círculo para cada AWG).

La distancia entre las guías de onda d_a, afecta la interferencia de las ondas ópticas que viajan por ellas. Si las guías están demasiado cerca, las ondas que ingresan a la región de propagación libre (FPR) de salida, pueden interferir constructivamente o destructivamente en puntos no deseados, aumentando el *crosstalk*. Cuando las guías están muy próximas entre ellas, es muy intuitivo notar que hay un mayor acoplamiento de onda evanescente entre ambas, en consecuencia aumenta el *crosstalk*. Para minimizar este acoplamiento, las guías deben estar separadas lo mínimo y suficientemente posible para reducir esta interacción evanescente, en consecuencia la diafonía se puede mejorar y se ve reducida como se observa en la Figura 8.14(b)).

Por otro lado, la separación entre las guías de onda d_a no debe ser muy grande,

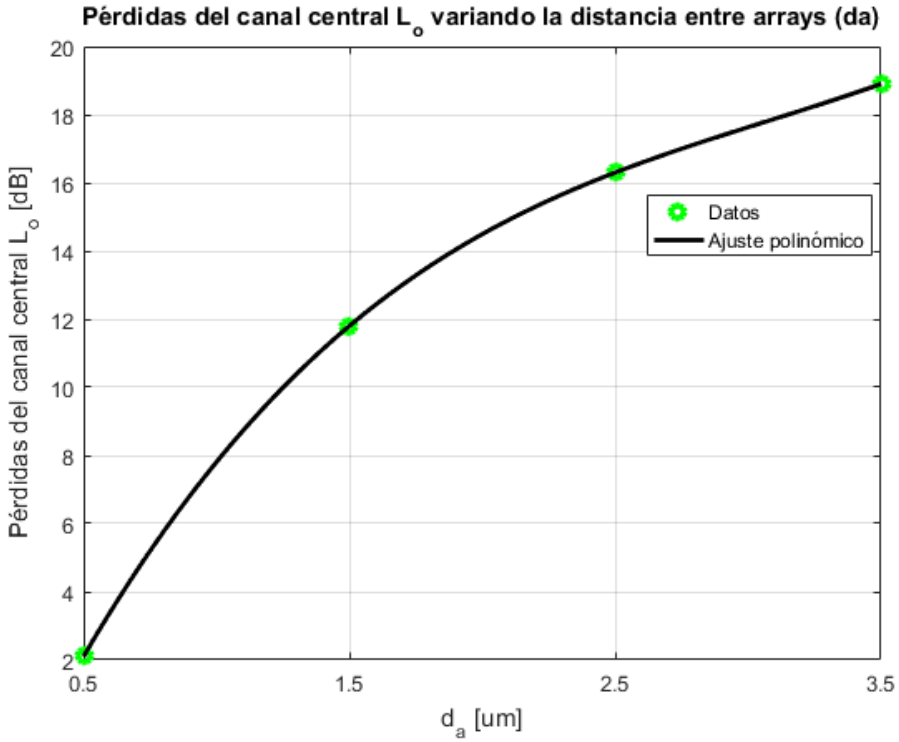


Figura 8.15: Pérdidas en el canal central *Lo* al incrementar la distancia d_a entre las guías de onda vecinas de los*arrays* en el AWG.

sino se toma en cuenta esta consideración, puede verse reducida la interferencia constructiva en los puntos de enfoque del AWG, por lo tanto, una separación grande provocará altas pérdidas de acoplamiento de la región de propagación libre (FPR) hacia el conjunto de *arrays* y viceversa. En consecuencia, disminuye la intensidad de las señales de salida y aumentan las pérdidas de inserción L_o (ver Figura 8.15, provocando un decaimiento en los máximos de transmisión de los canales centrales, y es un efecto no deseable en este tipo de sistemas.

Por ese motivo, cuando se diseña el d_a del AWG, se debe encontrar un compromiso entre el nivel de *crosstalk* deseado y las pérdidas de inserción que se genera al manipular este parámetro.

8.1.6. Desplazamiento de λ_C y *Free Spectral Range* (FSR).

Ahora, vamos a realizar un análisis de la sensibilidad de ciertas características del AWG, como el FSR y λ_c, al variar parámetros sensibles.

El orden m (diferencia de camino óptico entre guías adyacentes en términos de longitud de onda) influye en el *Free Spectral Range* (FSR) y en el desplazamiento de la longitud de onda central λ_c de manera significativa.

El FSR en un AWG es el intervalo de longitud de onda entre dos órdenes consecutivos que se enfocan en la misma posición de salida, su expresión fue introducida en la ec. 8.7, manipulando esta ecuación obtenemos que:

$$FSR_\lambda = \frac{\lambda_\mathrm{c}}{m \cdot (n_{g_w}/n_{eff_w})}, \tag{8.20}$$

donde n_{g_w} y n_{eff_w} son los índices del grupo y efectivo en las guías de onda, respectivamente. Como se puede ver, el FSR depende inversamente del orden m del AWG. A medida que aumenta m, el FSR disminuye, lo que significa que el intervalo de longitud de onda entre dos órdenes consecutivos se vuelve más pequeño como se observa en la Figura 8.16 con línea roja.

El orden m también afecta el desplazamiento de la longitud de onda central λ_c del AWG. La longitud de onda central para un orden dado se puede determinar mediante la expresión de la diferencia de camino óptico ΔL (ec: 8.12), y despejando de esta ecuación λ_c obtenemos:

$$\Delta\lambda_\mathrm{c} = \frac{1}{m} \cdot \Delta n_\mathrm{eff} \cdot L \tag{8.21}$$

Por lo tanto, en cambio en el orden m implica un cambio en la longitud de onda central.

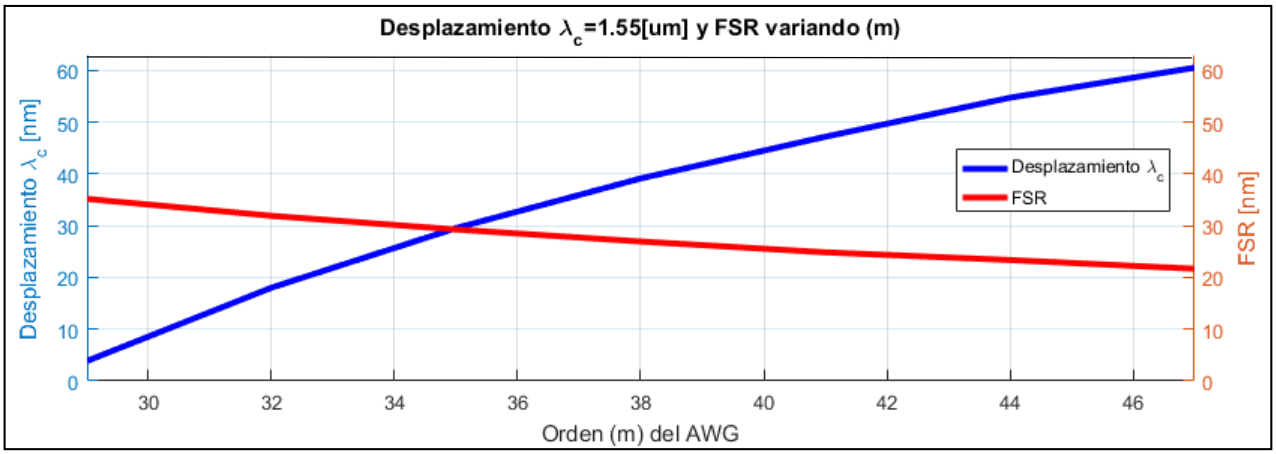


Figura 8.16: Desplazamiento del FSR y λ_c en función del orden m del AWG.

Por otro lado, el ancho de las guías de onda w influye en varios parámetros del AWG, como el índice efectivo n_{eff} y el índice de grupo n_g, que dependen del perfil de la guía incluyendo w. Al variar el ancho de las guías de onda se modifican estos índices, lo que a su vez afecta el FSR y la longitud de onda central λ_c.

Observando la ec. 8.20, vemos que el FSR, depende los índices n_{eff} y n_g, por lo que el FSR, se ve modificado, a la razón de n_{g_w}/n_{eff_w}. Además, estos dos índices pueden cambiar de manera diferente en función del ancho de la guía de onda w y otras propiedades del material.

Por último, la sensibilidad en el desplazamiento de la longitud de onda central λ_c, se puede entender observando la ec. 8.21. Si w aumenta, entonces el índice efectivo n_{eff} en guías de SOI también aumenta, por lo tanto, la longitud de onda central se desplaza y es directamente proporcional a n_{eff_w} y en consecuencia a w.

8.1.7. Resultados experimentales.

En la figura 8.17 se presenta la configuración experimental para medir la respuesta espectral de los AWGs 1x8. Se utiliza la estación de micro-posicionamiento desarrollada a lo largo de esta tesis para acoplar el chip de la Figura 8.18. Además se introdujo una fuente de luz LED Superluminiscente (SLED) a la entrada del AWG y un analizador de espectros ópticos (OSA) en los canales de salida del AWG. El OSA es de la firma Yokogawa, modelo AQ6370B con un rango espectral de detección de 600 nm a 1700 nm. Por otro lado, el SLED tiene rango espectral de emisión que va desde 1400 nm a 1650 nm.

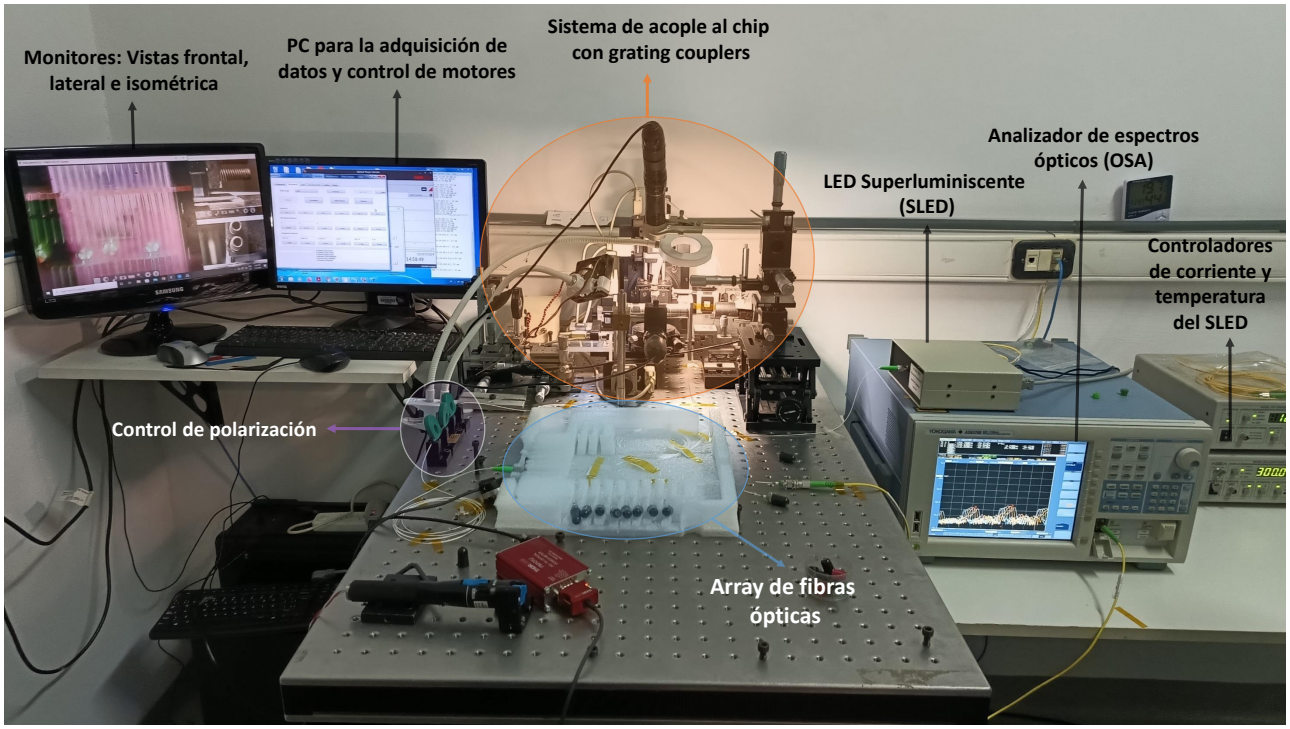


Figura 8.17: Set-Up experimental implementado para medir la respuesta espectral de los AWGs 1x8 preliminares fabricados en SOI.

En la Figura 8.18(b), se presenta el chip fabricado con tecnología *Silicon On Insulator*, mediante un proyecto multi-oblea (MPW) en la *foundrie* Cornestone (Cardiff). También se observan distintos dispositivos integrados diseñados por otros estudiantes y grupos de investigación. Los diseños de los AWG realizados en este trabajo se encuentran en el cuadro de borde blanco. La Figura 8.18(a) muestra la imagen amplificada de un AWG tomado por un microscopio con alto contraste. Se observa la entrada, las N guías de onda del *array*, las regiones de propagación libre (FPR) y las 8 salidas del demultiplexor.

En la figura 8.19 se muestran los monitores que permiten el adecuado acople del chip. Se puede visualizar el *fiber array*, los *gratings couplers* y AWGs integrados en el chip con tecnología SOI.

En la Figura 8.20(a) se muestra el diseño del chip enviado a fabricar, que contiene varios AWGs. En el panel (b) se presenta un AWG 1x8 junto al acoplador de entrada y los acopladores de salida. El panel (c) muestra un zoom del diseño del AWG.

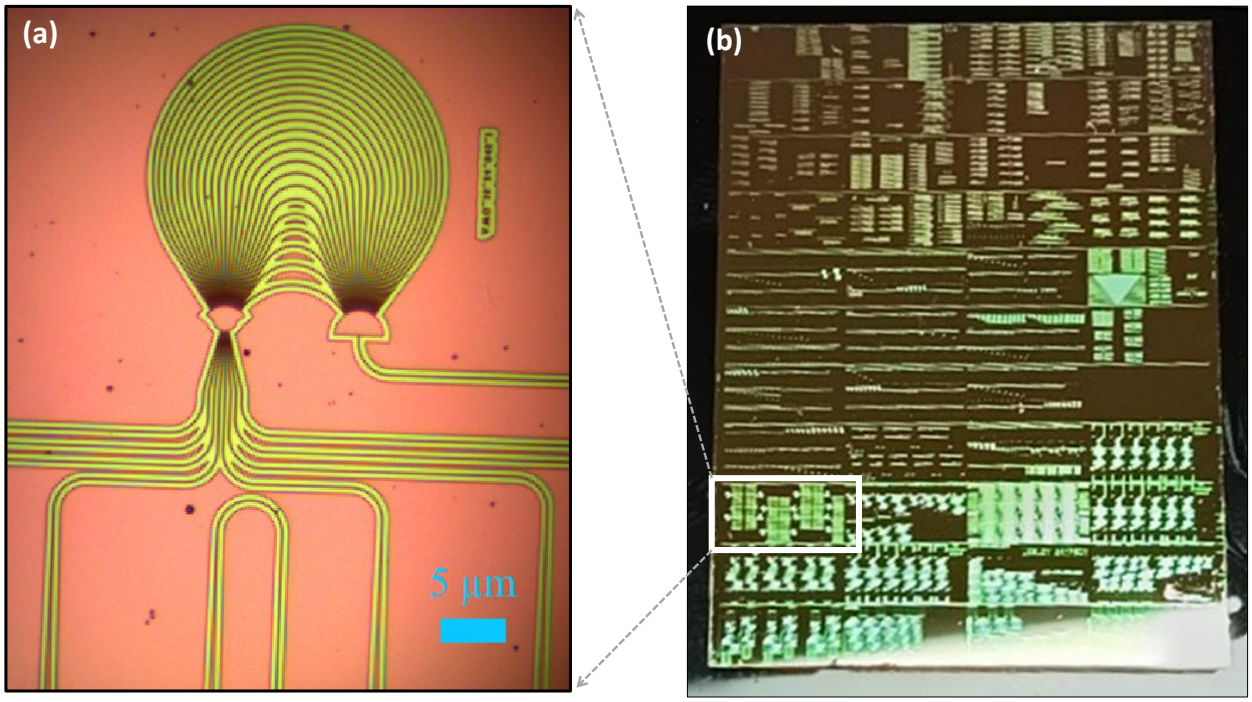


Figura 8.18: (a) Captura de un AWG desde un microscopio, integrado en el chip fotónico. (b) Chip fabricado en SOI mediante un *Multi Project Wafer* (MPW) por Cornestone.

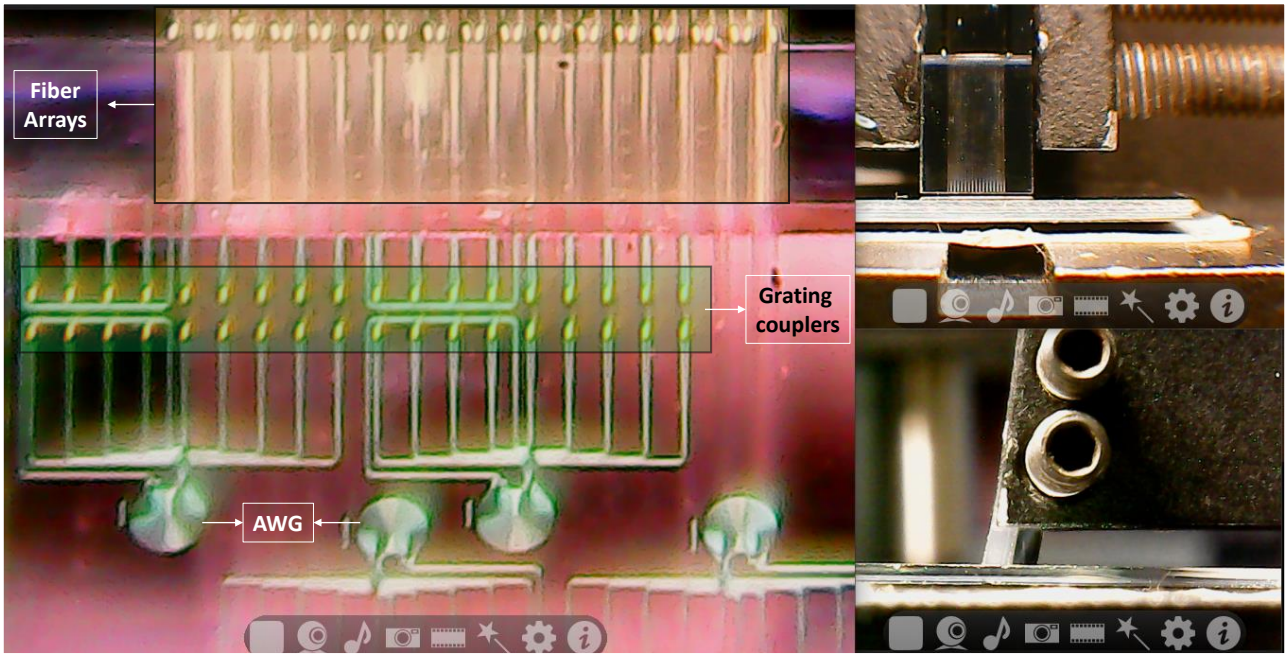


Figura 8.19: Monitores para acoplar el *array* de fibras con los *gratings couplers* y AWGs integrados en el chip fotónico.

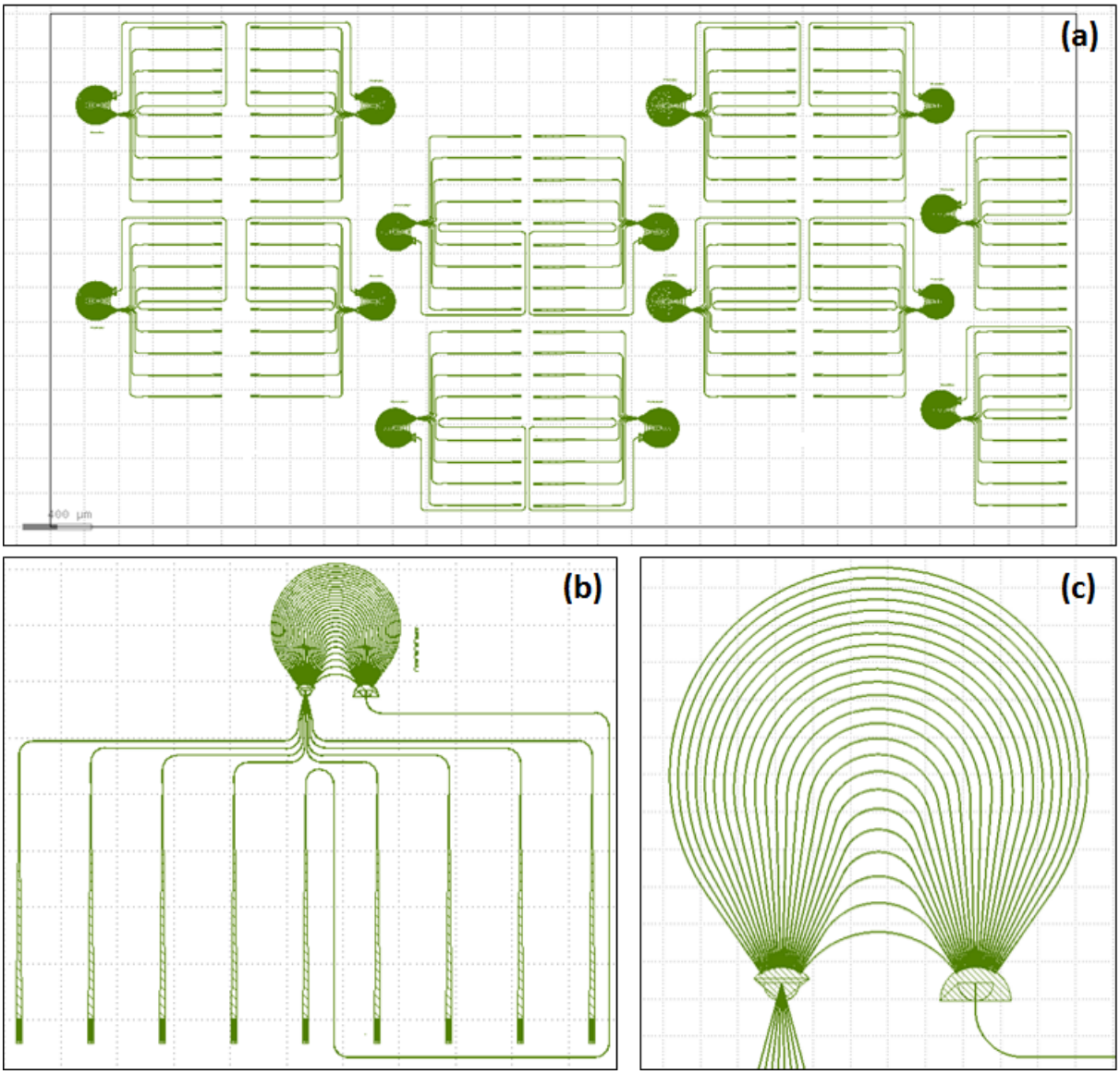


Figura 8.20: Cad del chip fabricado.

Finalmente, en la Figura 8.21 se muestran los resultados experimentales de dos tipos de AWGs. En la imagen superior se observa la respuesta espectral de un AWG_1 sin *linear tapers* y en la imagen inferior un AWG_2 con *linear tapers*. Recordemos bien, que este componente permite el acople vertical con dependencia espectral y se ubican en las entradas/salidas del AWG. En ambas figuras, la línea amarilla corresponde al espectro del led super-luminiscente (SLED) que fue conectado directamente a uno de los canales del analizador de espectros ópticos OSA. La línea celeste corresponde a la referencia de entrada en base a un dispositivo acoplador 1x1 integrado en el chip fotónico, en donde se puede observar la dependencia de la respuesta espectral que aportan los *grating couplers* de entrada/salida como se muestra en la Figura 8.22.

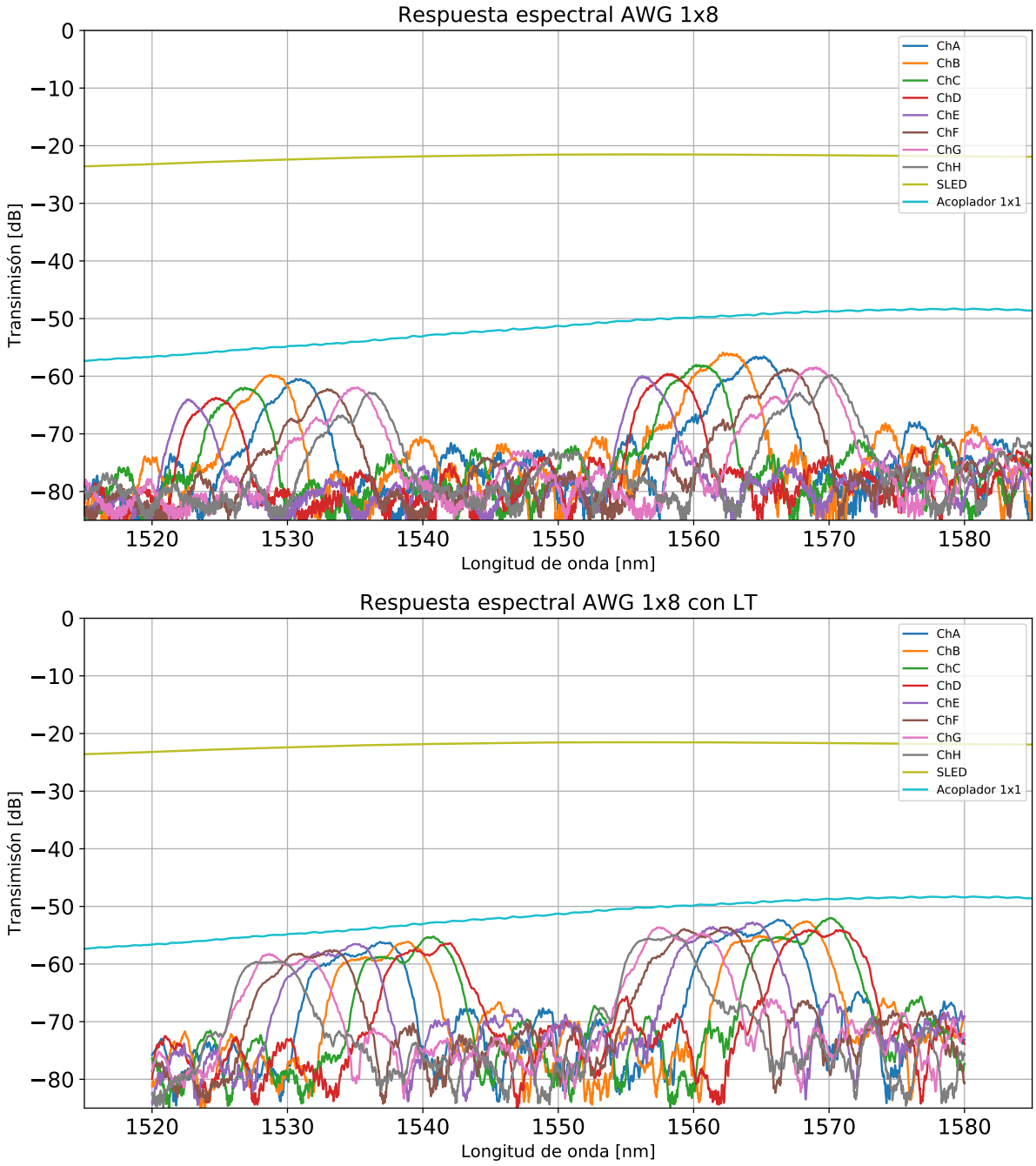


Figura 8.21: Respuesta espectral del AWG 1x8 junto a la fuente SLED (verde). Se muestra la transmisión de referencia en un acoplador 1x1 (celeste) que incluye todas las pérdidas de las fibras, acopladores, *grating couplers* de entrada y salida, además se observa la dependencia espectral de los *grating couplers*.

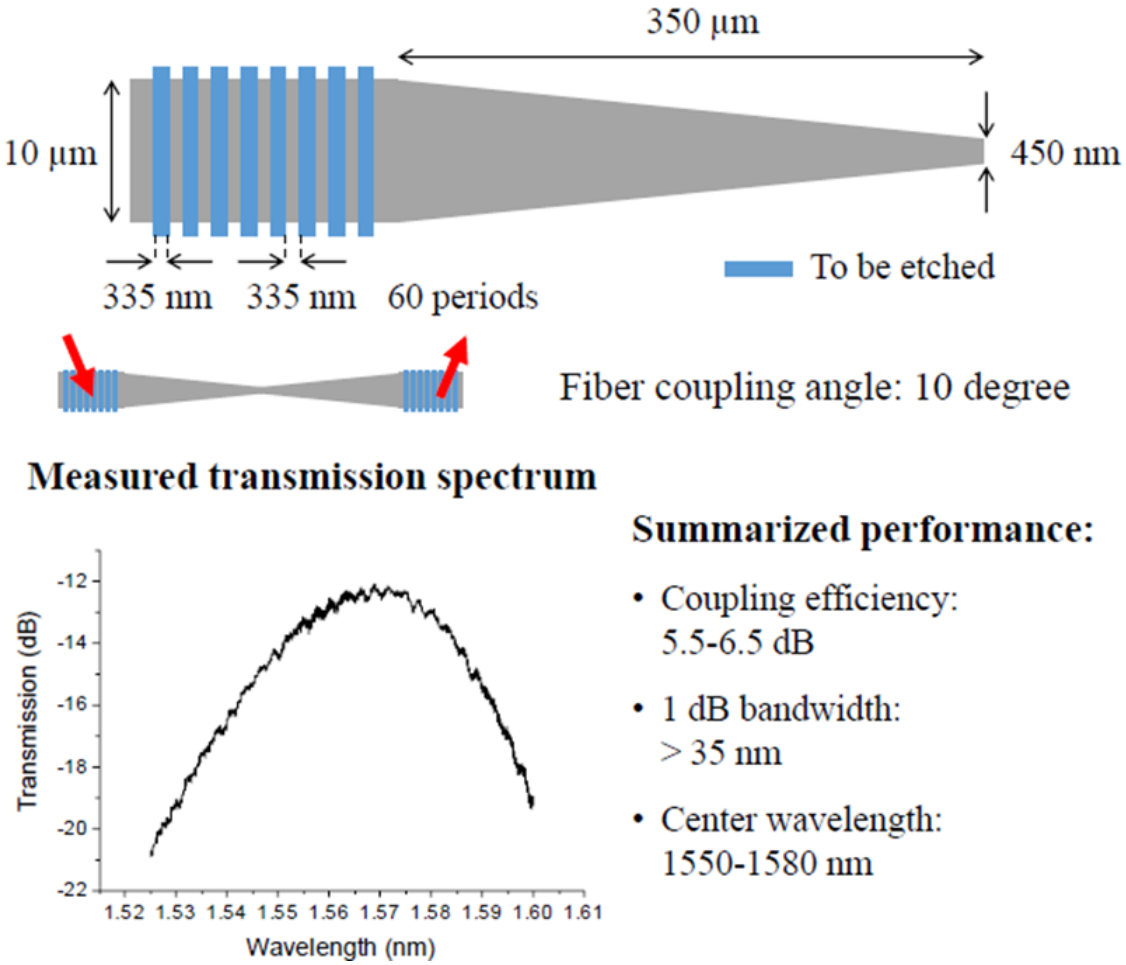


Figura 8.22: Dimensiones, características y respuesta espectral de un *grating coupler*, diseñado por Conerstone en la plataforma SOI de 220nm de espesor, *etching* de 120 nm, guías de onda tipo RIB, polarización TE, y longitud de onda central λ_c=1550 nm.

Los parámetros de diseño del AWG_1 son: orden m=30, cantidad de *arrays* N_{array} = 28, ancho de las guías w = 0.45 μm, distancia entre guías del *array* d_a = 1 μm, canales de salida Ch = 8 y espaciado de canal $\Delta\lambda$ = 2nm.

Para el AWG_2, los parámetros de diseño son: orden m=35, cantidad de *arrays* N_{array} = 24, ancho de las guías w = 0.45 μm, distancia entre guías del *array* d_a = 1.3 μm, canales de salida Ch = 8, espaciado de canal $\Delta\lambda$ = 2nm y largo del *linear taper* L = 23 μm.

Por otro lado, la Figura 8.23 muestra la transmisión óptica total para cada canal de salida de ambos AWGs. En particular, de estas curvas resultantes hemos considerado la resta de la curva de transmisión de referencia mostrada en la línea celeste de la Figura 8.21. Por lo tanto la Figura 8.23 presentan las pérdidas intrínsecas del dispositivo demultiplexor sin *linear taper* (arriba) y con *lineal taper* (abajo).

En la misma figura, se puede observar que ambas repuestas espectrales no se encuentran centradas en 1550 nm, este desplazamiento en λ_c se debe principalmente a los parámetros sensibles que modifican esta característica del AWG, como el orden m. Este análisis se pudo observar en la Figura 8.16, en donde se estudió como la variación del orden m en un AWG, desplaza λ_c.

De esta Figura también se pueden observar las pérdidas del canal central y el *crosstalk*. Para el AWG_1 de la Figura 8.23 (arriba), los valores obtenidos para $\lambda = 1530$ nm son:

- Pérdidas del canal central, $L_{o1} = -5$ dB
- *Crosstalk*, $CR_1 = -7$ dB
- No uniformidad entre el canal central y el externo, $L_{u1} = -4$ dB

Por otro lado, el AWG_2 para $\lambda = 1535$ nm presenta los siguientes valores:

- No uniformidad entre el canal central y el externo, $L_{u2} = -2$ dB
- Pérdidas del canal central, $L_{o2} = -2{,}5$ dB

Las pérdidas del canal central en el AWG_2 son menores en comparación con las del AWG_1. Esta mejora se debe a los *linear tapers* agregados entre la región de propagación libre 1 y las N guías del *array*. Como los *linear tapers* inician con una mayor apertura en la entrada, pueden capturar más luz y mejorar la transmisión y a su vez, reducen el efecto "Fabry-Perot" en el acoplador de entrada.

Los AWGs pueden presentar una característica a la cual denominados "aplanamiento" (*flattening)*. Existen varias técnicas para realizar un aplanado sobre la meseta de los lóbulos del AWG, por ejemplo, si se disponen guías de onda multimodo en los canales de salida [6]. Si el punto focal se mueve a lo largo de estos receptores anchos, casi el 100 % de la luz se acoplará, sobre una parte considerable de la apertura del receptor, lo que provocará una región plana de la respuesta en frecuencia, sin embargo, este enfoque es desfavorable para los sistemas monomodo.

Otro método es mediante la inclusión de sistemas del tipo MMI [7] [8]. Se puede obtener una respuesta aplanada con salidas monomodo aplicando un divisor de potencia de interferencia multimodo (MMI) corto al final de la guía de onda del transmisor (salida de los N_{array}). Este dispositivo convierte el modo de guía de onda simple en la entrada del acoplador en una imagen doble. El patrón de campo de salida resultante tiene una forma "similar a la de un camello" y la profundidad de la depresión central se puede controlar con el ancho de MMI. Si la imagen de

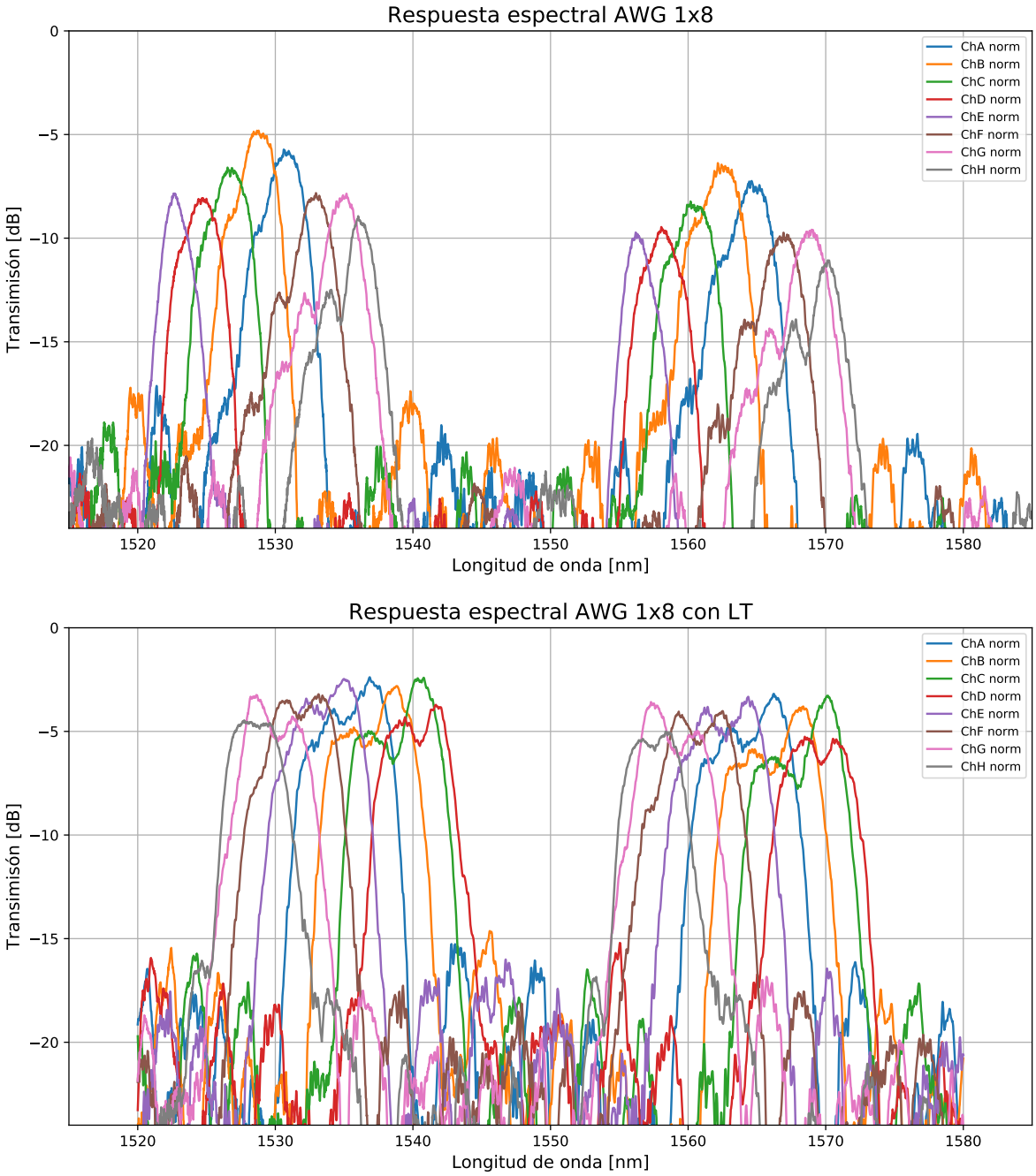


Figura 8.23: Respuesta real del AWG 1x8, desacoplando la dependencia espectral de los *grating couplers* y las pérdidas de acoplamiento del sistema.

este campo "con forma de camello" se mueve a lo largo de los canales de salida monomodo, la respuesta tendrá una región plana.

Otra razón por la cual se puede generar este aplanamiento, se debe a la apertura de los *linear tapers* en las salidas de las guías de onda de los N_{arrays}. En este diseño también se ingresaron linear tapers entre los N array de salida y la región de propagación libre 2. El ensanchamiento en las guías de onda de los N_{arrays} de salida puede provocar que las aperturas de salida tengan un comportamiento multimodal, por lo tanto, en el patrón de campo de salida resultante puede aparecer un segundo lóbulo que se monta sobre la región plana [9], así como se muestra en la Figura 8.23(abajo), en donde se observa una mejor transmisión, aunque el *crosstalk* entre canales vecinos se ha visto desfavorecido. Para resolver este desperfecto, en el diseño es conveniente ingresar *linear tapers* solo en las aperturas de entrada y no en las aperturas de salida de las N guías de onda del *array*. Esto daría como resultado una respuesta no plana pero de menor *crosstalk*.

Otra opción es mantener en el diseño del AWG_2 los *linear tapers* de entrada y salida en las guías de onda del *array*, pero con una espaciado de canal $\Delta\lambda$ más grande y así alejar los lóbulos espectrales, lo cual reduciría considerablemente el *crosstalk*, manteniendo bajas pérdidas y una respuesta plana. Asimismo, se podría considerar la posibilidad de agregar dispositivos MMI en las salidas de las N guías del *array* para conseguir aplanamiento. En muchas aplicaciones, es importante contar con una banda de paso aplanada para flexibilizar los requisitos de control de la longitud de onda, esto se debe a que la transmisión de luz dentro de este rango es uniforme, es decir, la eficiencia de transmisión no varía mucho con la longitud de onda. Esto es deseable porque garantiza que todas las longitudes de onda dentro de la banda de paso se transmitan de manera similar, sin picos ni caídas significativas en la intensidad.

Finalmente, podemos concluir que se diseñó, fabricó y caracterizó con éxito demultiplexores de longitud de onda preliminares utilizando la plataforma de Silicio Sobre Aislante (SOI). Los dispositivos fabricados mostraron bajas pérdidas. El sistema de micro-posicionamiento, junto con la adición del SLED (Led Superluminiscente) y el OSA (Analizador de Espectro Óptico), fueron fundamentales para obtener mediciones fiables y realizar una rápida caracterización de los dispositivos integrados en el chip fotónico.

8.1.8. Diseño de AWGs en Nitruro de Silicio.

El Nitruro de Silicio (Si_3N_4) ofrece un contraste de índice menor en comparación con los materiales típicos de silicio sobre aislante (SOI), lo que implica una menor densidad de integración, pero con la ventaja de tener menores pérdidas de propagación y errores de fase, siendo estos últimos un factor crítico al diseñar dispositivos interferométricos como en el caso del AWG. Es importante remarcar que esta tecnología también ofrece la posibilidad de diseñar dispositivos para un amplio rango de longitudes de onda, siendo posible guiar la luz en el visible (VIS) y el infrarrojo cercano (NIR) desde aproximadamente 400 nm hasta 2.3 μm. Las estructuras de las guías de onda en Si_3N_4, se realizan con equipos de fabricación compatibles con CMOS y procesos de Deposición Química de Vapor a Baja Presión (LPCVD).

En esta sección se presenta el diseño de AWGs basados en nitruro de silicio que pueden ser fabricadas por la *foundrie* Conerstone, siguiendo la misma metodología empleada en la plataforma *silicon on insulator* (SOI).

El primer paso es escalar el dispositivo demultiplexor con las dimensiones geométricas necesarias para un guiado de luz monomodo en Si_3N_4. Vamos a utilizar guías de onda tipo *strip*, espesor h = 300 nm y ancho w=1200 nm en base a una longitud de onda λ = 1550 nm, como se muestra en la Figura 8.24.

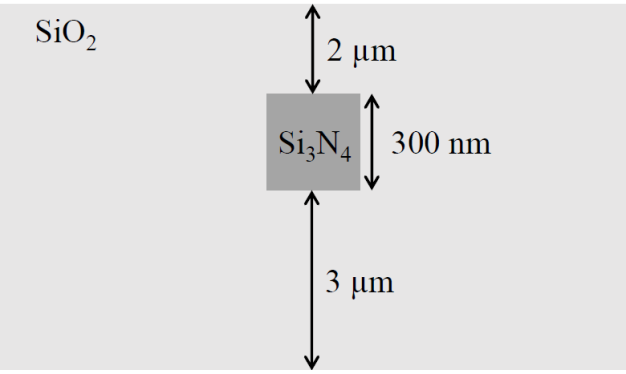


Figura 8.24: Dimensiones de guía de onda monomodo en nitruro de silicio con la estructura empleada por la *foundrie* Conerstone. La condición monomodo esta optimizada para λ = 1550 nm.

Por otro lado, el mismo fabricante nos ofrece los datos del índice de refracción en función de la longitud de onda λ que va de 200 nm a 1600 nm (Figura 8.25)

Los datos de la Figura 8.25, los ingresamos como un material nuevo en la librería del simulador y empezamos a computar los parámetros relevantes de las guías de onda monomodo en Si_3N_4. Por lo tanto, el índice efectivo n_e= 1.617, el índice del grupo n_g = 2.023 y el indice efectivo en las FPR_1 y FPR_2 n_{e_s}=1.695.

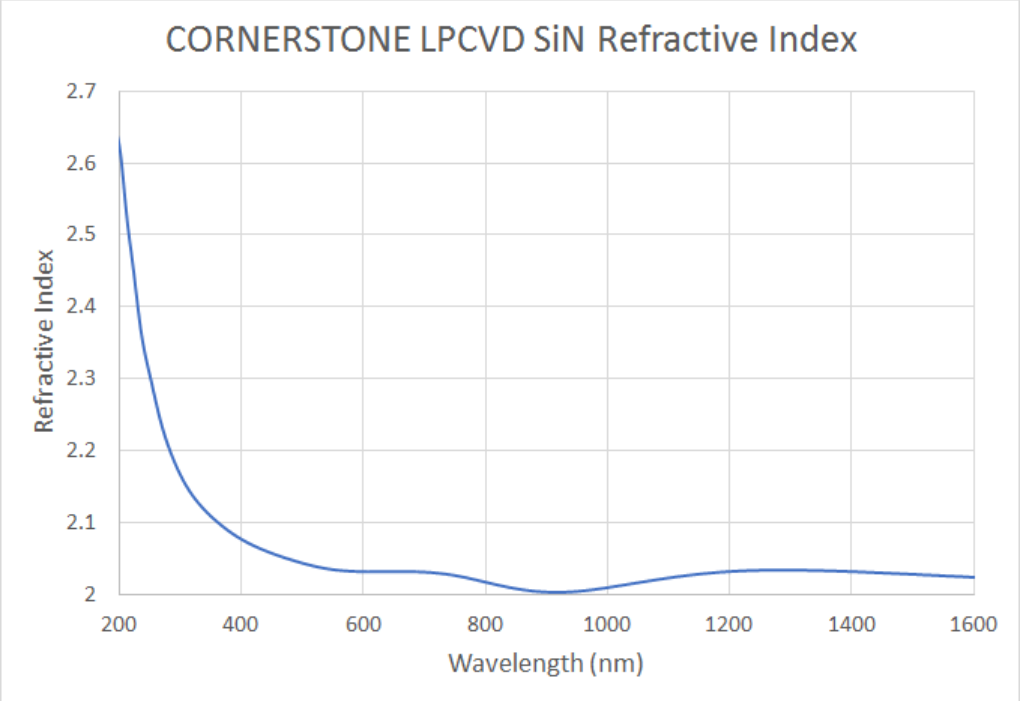


Figura 8.25: Indice de refracción vs. λ del nitruro de silicio, depositado mediante LPCVD por Cornestone.

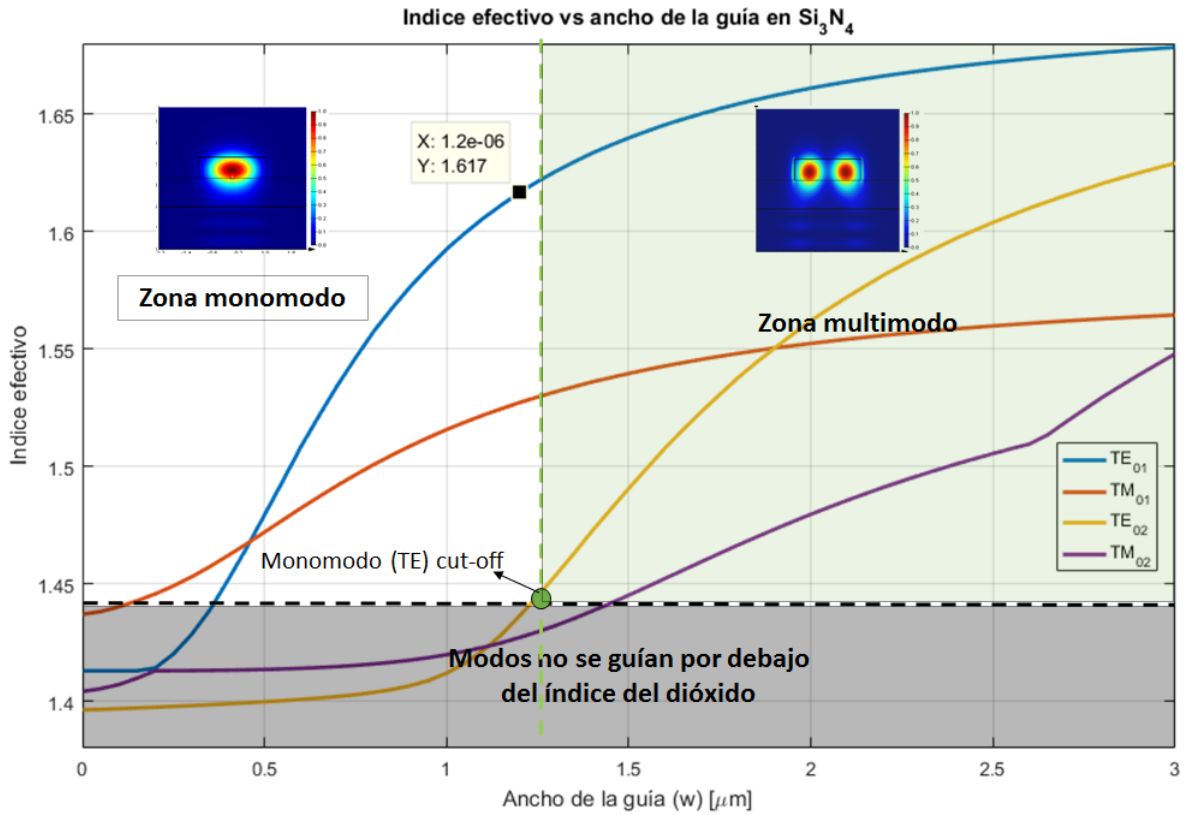


Figura 8.26: Indice efectivo vs ancho de la guía de onda w en nitruro de silicio. La zona de corte para guía de ondas monomodo es $w \approx 1.25$ μm

También analizamos el comportamiento de la guía de onda al cambiar su sección transversal. En la Figura 8.26 se muestra el barrido del ancho en la guía y la zona de corte para mantener su condición de monomodo.

El diseño del AWG en nitruro sigue la misma metodología utilizada en los AWGs basados en SOI (sección 8.1.3). Primero simulamos la región de propagación libre 1 (FPR_1) y los acopladores de entrada de las N_{array}. Luego, la luz se confina en cada N guía de onda, y a las salidas (acoplador de salida), los datos de propagación de los espectros de la primera simulación, se utilizan como fuentes de luz que ingresan a la región de propagación libre 2 (FPR_2), en donde finalmente los modos propagados interfieren constructivamente y hacen foco en los canales de salida. Por último, se conectan a los *grating couplers* o fibras de salida para su posterior análisis espectral.

A continuación, en la Figura 8.27 se presenta el diseño de un AWG 1x8, los parámetros de diseño son $\mathrm{N}_{array} = 32$, espaciado de canal $\Delta\lambda = 2$ nm, ancho de la guía $w = 1.2$ μm, distancia entre arrays $d_a = 2$ μm, orden $m = 28$, el diámetro de la FPR_1 y FPR_2 es $R_a = 84.77$ μm.

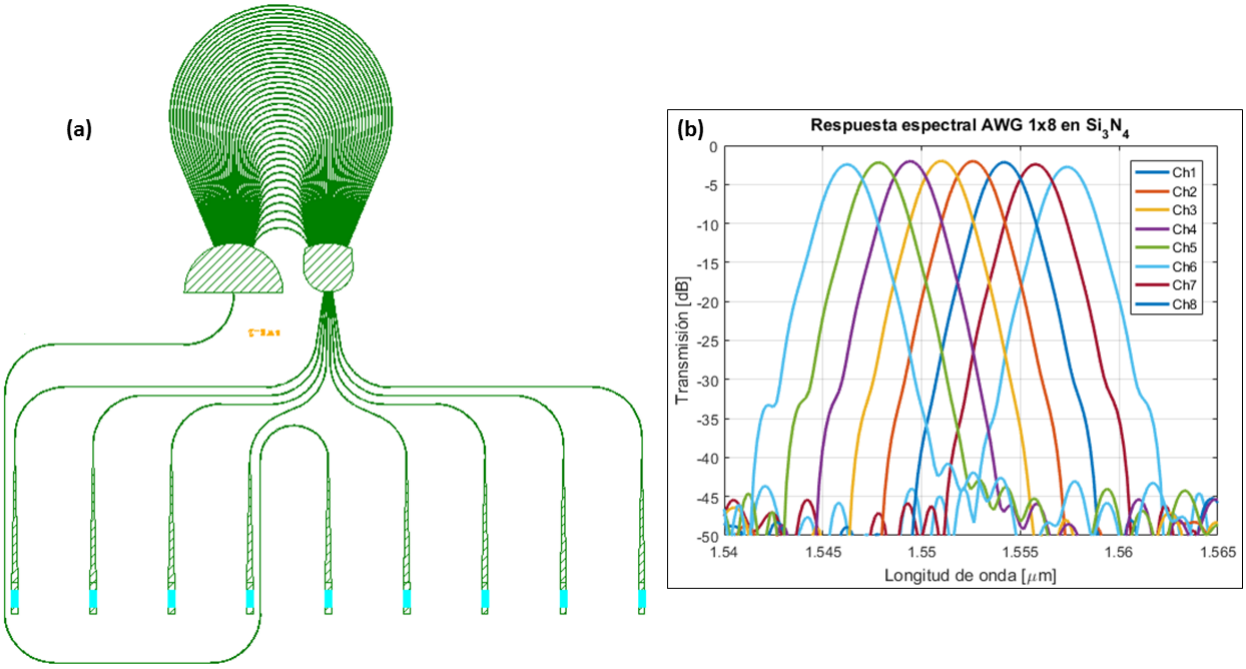


Figura 8.27: (a) *Layout* del AWG 1x8 en Si_3N_4 conectado con los *gratings couplers*. (b) Respuesta espectral del AWG diseñado.

Las pérdidas del canal central L_o = -1.4 dB, y un *crosstalk* con el canal vecino de CR = -3.6 dB y una No uniformidad entre el canal central y el exterior L_u = -0.7 dB.

En la Figura 8.28 se presenta un AWG 1x16, los parámetros de diseño son N_{array} = 24, espaciado de canal $\Delta\lambda$ = 2 nm, ancho de la guía w = 1.2 μm, distancia entre *arrays* d_a = 5 μm, orden m = 24, el diámetro de la FPR_1 y FPR_2 es R_a = 150.6 μm.

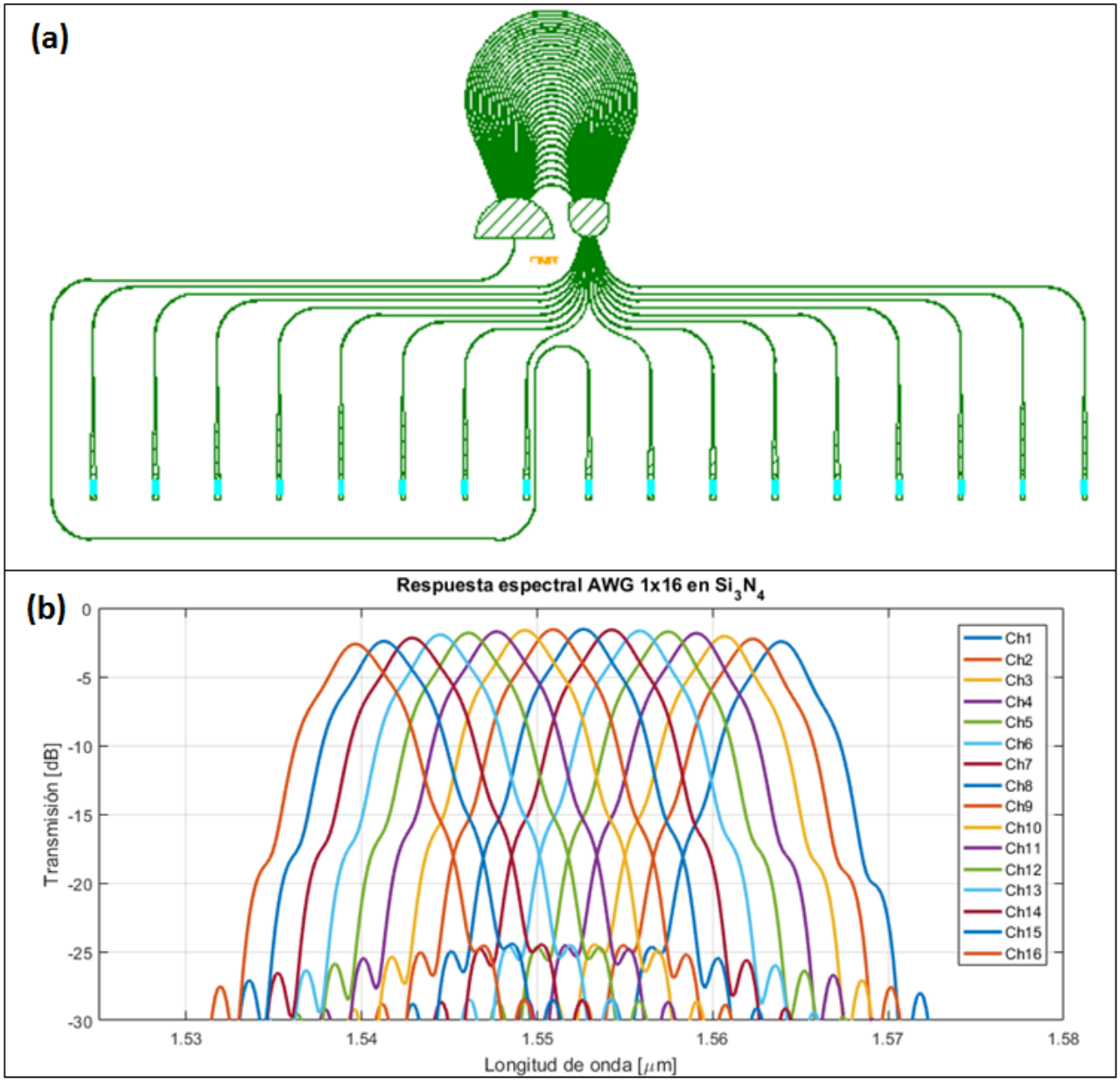


Figura 8.28: *Layout* del AWG 1x16 en Si_3N_4 conectado con los *gratings couplers*. (b) Respuesta espectral del AWG diseñado.

Las pérdidas del canal central L_o = -1.6 dB, y un *crosstalk* con el canal vecino de CR = -2.32 dB y una No uniformidad entre el canal central y el exterior L_u = -0.9 dB.

Podemos concluir que se diseñaron AWGs con la tecnología del nitruro de sili-

cio, siguiendo la misma metodología desarrollado en la plataforma SOI. Se diseño un AWG 1x8 y luego fue escalado a 1x16, en ambos casos los demultiplexores presentaron bajas perdidas de inserción.

Finalmente, las grandes diferencias entre los AWGs en Si_3N_4 y SOI están relacionados con su tamaño final y las pérdidas. En SOI los AWGs presentaron un área final menor respecto de los AWGs basados en nitruro, esto debido al alto contraste de índice que presenta la plataforma SOI, por ejemplo, un AWG 1X8 en SOI ocupa un área de 228x237 μm^2, mientras que un AWG en nitruro de silicio ocupa un área de 465x362 μm^2. Sin embargo, las pérdidas que presentaron los AWGs en nitruro son menores que los basados en SOI, esto se debe a la baja absorción óptica que presenta el nitruro de silicio en las longitudes de onda de interés (1500 a 1600 nm), por ejemplo, un AWG 1x8 basado en nitruro (sin *lineal tapers*) presentó pérdidas de inserción en el canal central de -1.4 dB, mientras que un AWG 1x8 basado en SOI (sin *lineal tapers*) presento pérdidas en el canal central de -5 dB.

8.2. Diseño de sistemas basados en anillos resonadores y AWGs integrados en SOI, para la detección de gases en rango espectral NIR.

En esta sección se desarrollarán sensores espectroscópicos integrados, basados en resonadores de micro-anillos (MRR) y AWGs (*Arrayed Waveguide Gratings*) integrados en SOI (*Silicon on Insulator*). El objetivo de estos sensores es la detección de gases en el rango espectral NIR (infrarrojo cercano). El principio de funcionamiento de este sistema se basa en demultiplexar un espectro de entrada en la banda NIR con alta resolución a través de varios sub-sistemas.

El esquema del sistema consiste en introducir un sistema de doble anillo resonador (CROW, *Coupled Resonator Optical Waveguide*) en la entrada de un AWG. Los anillos resonadores se calibran para seleccionar las longitudes de onda de interés del espectro de entrada. A la salida, obtenemos estas longitudes de onda con una anchura de modo muy estrecha, una característica típica de los anillos resonadores.

Posteriormente, las longitudes de onda con anchura estrecha ingresan al AWG, donde son separadas con un lóbulo lateral filtrado gracias a los anillos resonadores. Como resultado, se reduce el *crosstalk* entre los canales vecinos a la salida del AWG, logrando así una alta resolución para la demultiplexación.

Ciertas características de los anillos resonadores son muy sensibles a los defectos de fabricación. Por ejemplo, la fase del FSR (*Free Spectral Range*) puede desajustarse respecto al diseño inicial. Además, es importante sincronizar el FSR del CROW con el espaciado de canales del AWG. De lo contrario, las longitudes de onda filtradas no podrán ser demultiplexadas correctamente a la salida del AWG.

Para lograr una correcta demultiplexación, se pueden integrar calentadores alrededor de la cavidad del anillo resonador para modular la fase. Este proceso se conoce como ajuste o "*tuning*" del micro-anillo.

Por lo tanto, en esta sección vamos a introducir el principio de funcionamiento de los CROW y el *tuning* en los micro-anillos. Finalmente, mediante la combinación de ambos (CROW + *tuning*), agregadas en la entrada del AWG, se desarrollan espectrómetros integrados en silicio de alta resolución.

8.2.1. Diseño de Anillos resonadores CROW basados en SOI.

Los micro-resonadores ópticos han captado una notable atención tanto teórica como experimental debido a sus aplicaciones en una amplia gama de campos, que van desde la física fundamental hasta los sistemas de telecomunicaciones [10]. Un CROW (*Coupled Resonator Optical Waveguide*) es una estructura fotónica en la que la luz se propaga por una serie de resonadores ópticos, en virtud del acoplamiento entre ellos. [11]. La función principal de un CROW es manipular la luz de una manera específica, permitiendo la sintonización y filtrado de las señales ópticas a través de la interferencia constructiva y destructiva entre los modos de los resonadores [12].

La teoría de los CROW y otros sistemas de resonadores acoplados se ha explorado ampliamente en los últimos años. Para una comprensión integral de los CROW, se deben identificar los supuestos inherentes y las relaciones entre los diferentes enfoques teóricos, de modo que se utilice el modelo apropiado para estudiar el problema en cuestión. Los tres formalismos más comúnmente utilizados para estudiar los CROW son la aproximación estricta [11], el método de la matriz de transferencia [13] [14] y la teoría del modo temporal acoplado [15].

En este trabajo nos vamos a enfocar en el método de la matriz de transferencia. Para mostrar la convergencia de este enfoque teórico, elegimos primero estudiar un modelo específico de una secuencia de resonadores de anillo que están acoplados en serie y en fase coincidente, por las siguientes razones:

1. Se pueden fabricar resonadores de anillo para soportar un solo modo transversal en una región espectral dada, que es un característica esencial en sus aplicaciones prácticas y científicas.

2. El acoplamiento de ondas evanescentes entre resonadores de anillo y las guías de ondas ópticas se pueden lograr de forma sencilla y en geometría plana mediante técnicas litográficas simples.

3. La estructura modal simple y el mecanismo de acoplamiento facilitan un tratamiento analítico esencialmente exacto de secuencias arbitrarias de resonadores de anillos acoplados y, por lo tanto, una comparación significativa con los experimentos.

Análisis de Matriz de Transferencia

En la práctica, el número de resonadores acoplados en un CROW es finito y posiblemente no grande; por lo tanto, necesitamos una herramienta de análisis orientada al diseño que pueda manejar cualquier número de resonadores $1 \leq N \leq$

∞. El enfoque de la matriz de transferencia [13] [14] es particularmente poderoso porque puede manejar cualquier secuencia arbitraria de resonadores y acopladores, lo cual es un requisito previo para el diseño general de filtros ópticos [16] [15].

Para resonadores de anillo, una onda especial e importante que se puede excitar, es aquella en la que cada resonador puede soportar una onda viajera en sentido horario o antihorario, con un sentido de circulación opuesto al de sus vecinos inmediatos, así como se muestra en la Figura 8.29.

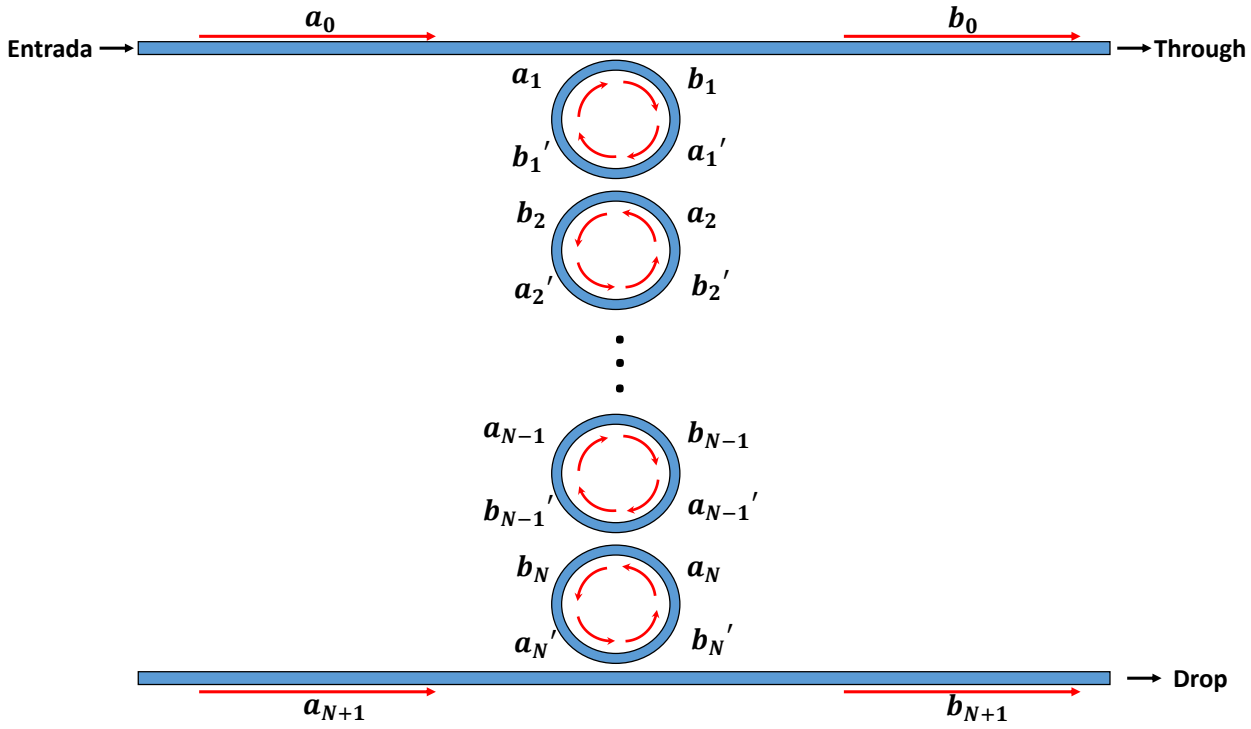


Figura 8.29: Onda viajera en una cadena finita de anillos resonadores.

Esta onda circulante no es un modo propio del CROW, sino más bien una superposición de los modos propios de Bloch que consisten en ondas estacionarias en cada resonador [14]. Se puede calcular la transmisión a través del CROW, multiplicando sucesivamente una matriz de transferencia que caracteriza el acoplamiento entre dos anillos adyacentes y otra matriz que da cuenta de la propagación del campo en los anillos.

Describimos la propagación del campo en los anillos. Utilizando la notación de la Figura 8.29, describimos la región de acoplamiento mediante la matriz de dispersión:

$$\begin{pmatrix} a_{n+1} \\ b_{n+1} \end{pmatrix} = P \begin{pmatrix} a_n' \\ b_n' \end{pmatrix}, \quad P = \frac{1}{\kappa} \begin{pmatrix} -t & 1 \\ -1 & t^* \end{pmatrix}, \tag{8.22}$$

donde t es el coeficiente de transmisión, κ es el coeficiente de acoplamiento adimensional sobre la longitud de acoplamiento, y $|t|^2 + |\kappa|^2 = 1$ (ec: 3.28 introducida en la sección 3.4.5 de anillos resonadores) para acoplamiento sin pérdidas. A medida que el campo se propaga alrededor del anillo, acumula fase y puede atenuarse, de modo que

$$\begin{pmatrix} a'_n \\ b'_n \end{pmatrix} = Q \begin{pmatrix} a_n \\ b_n \end{pmatrix}, \quad Q = \begin{pmatrix} 0 & \exp(-i\pi\beta R) \\ \exp(i\pi\beta R) & 0 \end{pmatrix}, \tag{8.23}$$

donde β es la constante de propagación en el anillo dada por $\beta = n\omega/c$, donde n es el índice efectivo dependiente de la frecuencia. β puede incluir una parte imaginaria que tiene en cuenta la pérdida o ganancia. Combinando las Ecuaciones 8.22 y 8.23, tenemos

$$\begin{pmatrix} a_{n+1} \\ b_{n+1} \end{pmatrix} = PQ \begin{pmatrix} a_n \\ b_n \end{pmatrix}$$

Las matrices P y Q se pueden especificar para cada frecuencia y tener en cuenta cualquier dependencia de frecuencia del índice efectivo, la pérdida y el coeficiente de acoplamiento. P y Q también se pueden especificar de manera diferente para cada resonador en el CROW, considerando las diferencias en las propiedades del resonador y los coeficientes de acoplamiento.

Multiplicando sucesivamente P y Q, obtenemos una relación entre las señales de entrada, de *through* y *drop* mostradas en la Figura 8.29

$$\begin{pmatrix} a_{N+1} \\ b_{N+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ b_0 \end{pmatrix}$$

Para una sola entrada a la guía de onda, a_0, $a_{N+1} = 0$. Por lo tanto, las funciones de transferencia en los puertos de *through* y *drop* son, respectivamente,

$$\frac{b_0}{a_0} = -\frac{A}{B}, \quad \frac{b_{N+1}}{a_0} = C - \frac{AD}{B}.$$

8.2.2. Moduladores de micro-anillo

El anillo resonador fue descrito en la sección 3.4.5, el cual presenta un alto índice Q, tiene una fuerte selectividad en longitud de onda y actúa como un filtro de ancho de banda estrecho. La longitud de onda resonante está determinada por la fase de ida y vuelta del resonador. Por lo tanto, cuando se opera a una longitud de onda cercana a la resonancia de un resonador óptico, la transmisión es muy

sensible al cambio de fase de la cavidad. En base a este efecto, se puede obtener distintos tipos de moduladores muy eficientes y con distintos enfoques, por ejemplo integrando calentadores (*heaters*) en la cavidad del resonador para modular la fase a través del efecto termo-óptico (*tuning*) o generar *switchs* termo-ópticos, también integrando junturas-pn en la cavidad para modular la fase mediante el efecto plasma, o generar atenuadores ópticos variables. Existen varios artículos sobre moduladores en anillo, se pueden revisar en [17] [18] [19].

Comúnmente se utilizan dos configuraciones de resonador de anillo, filtros de *all-pass* y *add-drop*. En este trabajo usamos la configuración *add-drop* para el *tuning* en el microanillo , en donde la cavidad se conforma por una guía de onda circular de 360°.

Debido a que el modulador de micro-anillo solo puede funcionar dentro de una ventana espectral estrecha alrededor de su longitud de onda resonante, generalmente se necesita estabilización de longitud de onda para aplicaciones prácticas. Entonces, una parte de la cavidad óptica del anillo se la integra con un calentador de resistencia (sobre el *cladding*), para una sintonización térmica y estabilidad de la longitud de onda deseada.

Efecto termo-óptico

El efecto termo-óptico es un efecto lento, que se utiliza principalmente para ajustar el punto de operación de dispositivos fotónicos o como un actuador para interruptores. De hecho, bajo un cambio de temperatura (ΔT), la variación del índice de refracción (Δn) del material también cambia siguiendo esta expresión para silicio:

$$\frac{\Delta n}{\Delta T} = 1{,}87 \times 10^{-4}\,\mathrm{K}^{-1}$$

denotado como el coeficiente termo-óptico del material (en este caso, coeficiente del silicio). En algunos casos, cuando la potencia eléctrica aplicada al dispositivo es alta, la temperatura puede aumentar, lo que lleva a un desplazamiento del comportamiento del componente. En la mayoría de las aplicaciones, el efecto termo-óptico debe abordarse, ya sea para compensar la deriva térmica o para ajustar la longitud de onda de operación.

Los cambios en el índice de refracción del silicio debido a efectos térmicos se producen por alteraciones en la distribución de portadores de carga, fonones y una contracción o expansión de la banda prohibida.

Sintonización activa: Desfasador térmico.

En esta apartado, vamos a considerar la implementación de un desfasador utilizando calentadores térmicos (*heaters*). A continuación se describe el método.

Se ingresa una resistencia metálica por encima de la guía de onda, de modo que el calor generado en el calentador, descienda hacia el sustrato y más allá de la guía de onda. El calentador debe estar colocado lo suficientemente por encima de las guías como para no introducir pérdidas ópticas, normalmente se sitúan entre 1 y 2 μm por encima de la guía de onda.

La eficiencia del calentador es una cuestión importante para los sistemas fotónicos de silicio, y el valor de mérito común es la eficiencia de sintonización, expresada como mW/FSR, es decir, la potencia requerida para obtener un desplazamiento de fase óptico de 2π en una guía de onda, o también en nm/V^2, es decir, el desplazamiento de fase óptico por cada voltio cuadrado aplicado. Esta cifra de mérito sugiere que la eficiencia es casi independiente de la longitud del desfasador. Un desfasador térmico corto requerirá una temperatura de funcionamiento más alta para lograr el mismo desfase que un desfasador largo; sin embargo, consumirá la misma energía. Esta independencia de longitud es cierta para guías de ondas desfasadoras rectas, donde la estructura puede considerarse como una sección transversal 2D. Las estructuras compactas (como guías de onda curvas) con calentadores, requerirán un modelado térmico 3D, las mismas pueden mejorar la eficiencia del calentador, ya que el calor se encuentra más concentrado en la guía de onda de la estructura compacta.

8.2.3. Diseño de un CROW con desfasador térmico.

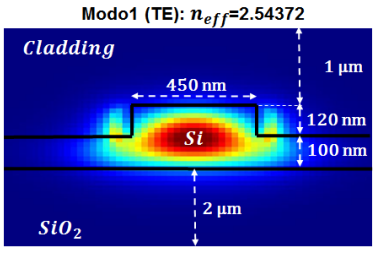


Figura 8.30: Dimensiones de la guía de tipo RIB en la plataforma SOI, implementada en el diseño del CROW.

A continuación, se presenta el diseño de un filtro CROW compuesto de dos anillos resonadores idénticos, cada uno con un coeficiente de acoplamiento k_1 entre el anillo y el bus, y un coeficiente de acoplamiento k_2 entre ambos anillos, como se muestra en la Figura 8.31. Se utiliza una guía de onda de silicio tipo RIB y la plataforma tecnológica es *Silicon On Insulator* (SOI) (Figura 8.30). Las dimensiones de la guía de onda de Si tiene un ancho w =450 nm, altura de la guía h =220 nm, altura de *slab* h_s 100 nm, revestimiento (*cladding)* con SiO_2 de 1 μm, sobre un box de 2 μm también con SiO_2.

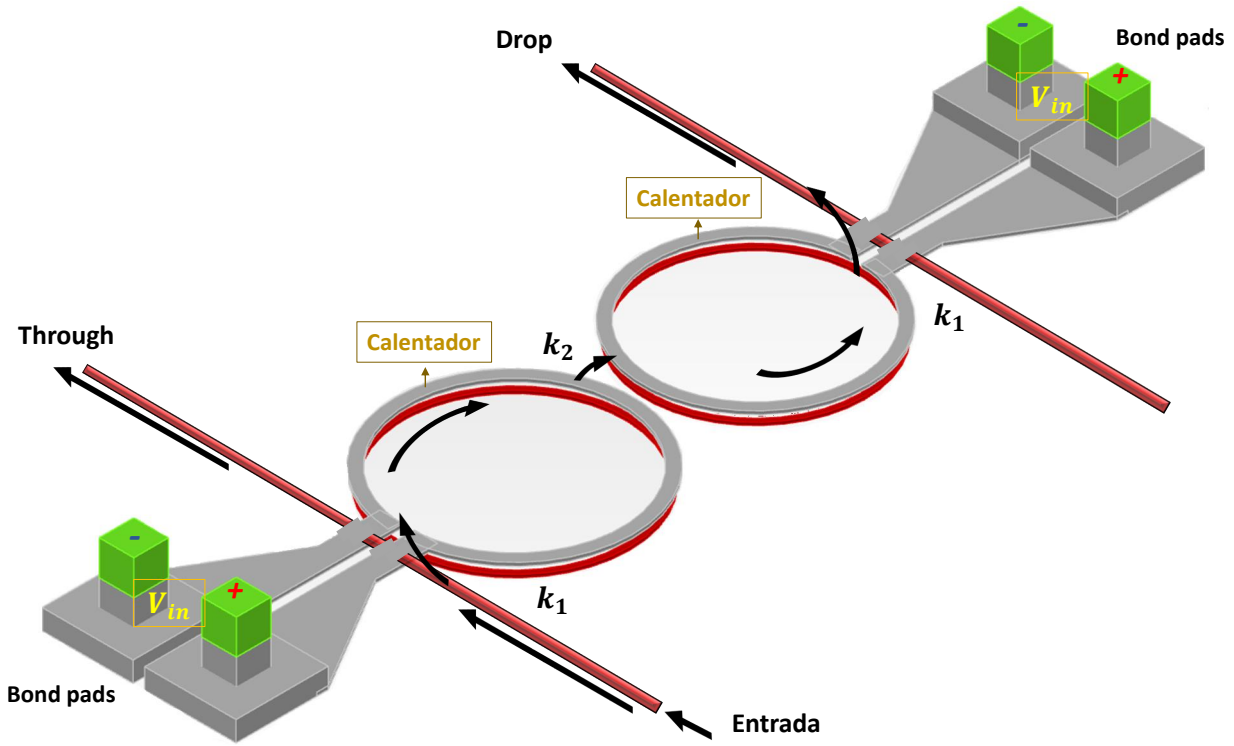


Figura 8.31: Esquema del CROW conformado por dos anillos idénticos con calentadores. κ_1 representa el acoplamiento anillo-bus y κ_2 el acoplamiento anillo-anillo.

El objetivo es diseñar un filtro con un FSR de 5.8 nm y una longitud de onda central de 1550 nm, este valor determinará el rango de longitudes de onda que podemos separar cuando ingresen a los AWGs, como se verá más adelante. Para el diseño será necesario calcular los radios de los anillos, el gap entre el anillo-anillo y el gap entre anillo-bus. También se determinará el voltaje de sintonización térmica necesario para obtener una longitud de onda filtrada a 1550 nm.

El primer paso es computar el índice efectivo n_{eff} e índice de grupo n_g en las guía de onda, utilizando el resolvedor de auto-modos en MODE-Lumerical. El índice de grupo se utiliza para determinar el radio del anillo r requerido para obtener el FSR deseado usando la fórmula:

$$FSR = \frac{c}{n_g 2\pi r} \tag{8.24}$$

Luego, si bien es cierto que se podría realizar simulaciones FDTD de toda la estructura CROW, las simulaciones FDTD en cavidades requieren de tiempos de simulación muy largos y son pocos prácticas para realizar barridos de parámetros. Por este motivo, se parametrizó un modelo compacto del CROW utilizando Lumerical INTERCONNECT, en donde se computan las matrices de transferencia con la metodología que se introdujo en la sección 8.2.1. Bajo este régimen,

podemos explorar la dependencia de las características del dispositivo de varios parámetros de diseño, como los índices efectivos y de grupo, el radio del anillo y los coeficientes de acoplamiento.

Los resultados de la simulación muestran que los índices son $n_{eff_w} = 2{,}544$ y $n_{g_w} = 3{,}858$ en las guías rectas. Utilizando la fórmula del FSR (ec:8.24), se determina que el radio del anillo requerido es r = 17 μm. Como se trata de un radio grande, se verifica con el resolvedor de auto-modos los índices en las curvas del anillo y obtenemos $n_{eff_b} = 2{,}545$, $n_{g_b} = 3{,}856$. Por lo tanto, asumimos que las características del modo de guía de onda curva son similares a las de la guía de onda recta, y para simplificar, se considera los índices efectivos de la guía recta.

Por otro lado, se utiliza un desfasador térmico para cambiar la fase de transmisión de la señal de entrada. Se puede generar un desfasador dependiente de la temperatura, utilizando un cable metálico (*heater*) cerca de una guía de onda que actúa como fuente de calor para sintonizar térmicamente la guía de onda como se detalla en la Figura 8.31. Dado que el índice de refracción de los materiales dependen de la temperatura, al variar la temperatura de la guía de onda, las características modales de la guía de onda, como el índice efectivo, la fase y las pérdidas, cambiarán.

El cambio de fase de una guía de onda depende del cambio del índice efectivo y de la longitud L de la guía de onda:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi(n_{\text{eff}} - n_{\text{eff0}})L}{\lambda} \tag{8.25}$$

Entonces, los índices efectivo y de grupo para una guía de onda curva, se calculan a temperatura ambiente (300 K). Para el silicio, se utiliza una sensibilidad del índice efectivo a la temperatura de dn/dT = 1,87e^{-4}. Esto permitirá realizar un barrido de la temperatura en la simulación, para poder calcular la variación en el índice efectivo. Suponemos que la temperatura del anillo es uniforme a lo largo de toda su sección transversal.

Luego, se hace un barrido de los coeficientes de acoplamiento κ_1 y κ_2, y de esta manera se determina los valores óptimos de acople para este par de coeficientes. Entonces, visualizando la ganancia espectral de la Figura 8.32, seleccionamos κ_1^2=0.13 y κ_2^2=0.0048 como valores nominales para nuestro diseño. En la misma figura se muestra el espectro de ganancia con esos valores y se los compara con otros valores de menor ganancia.

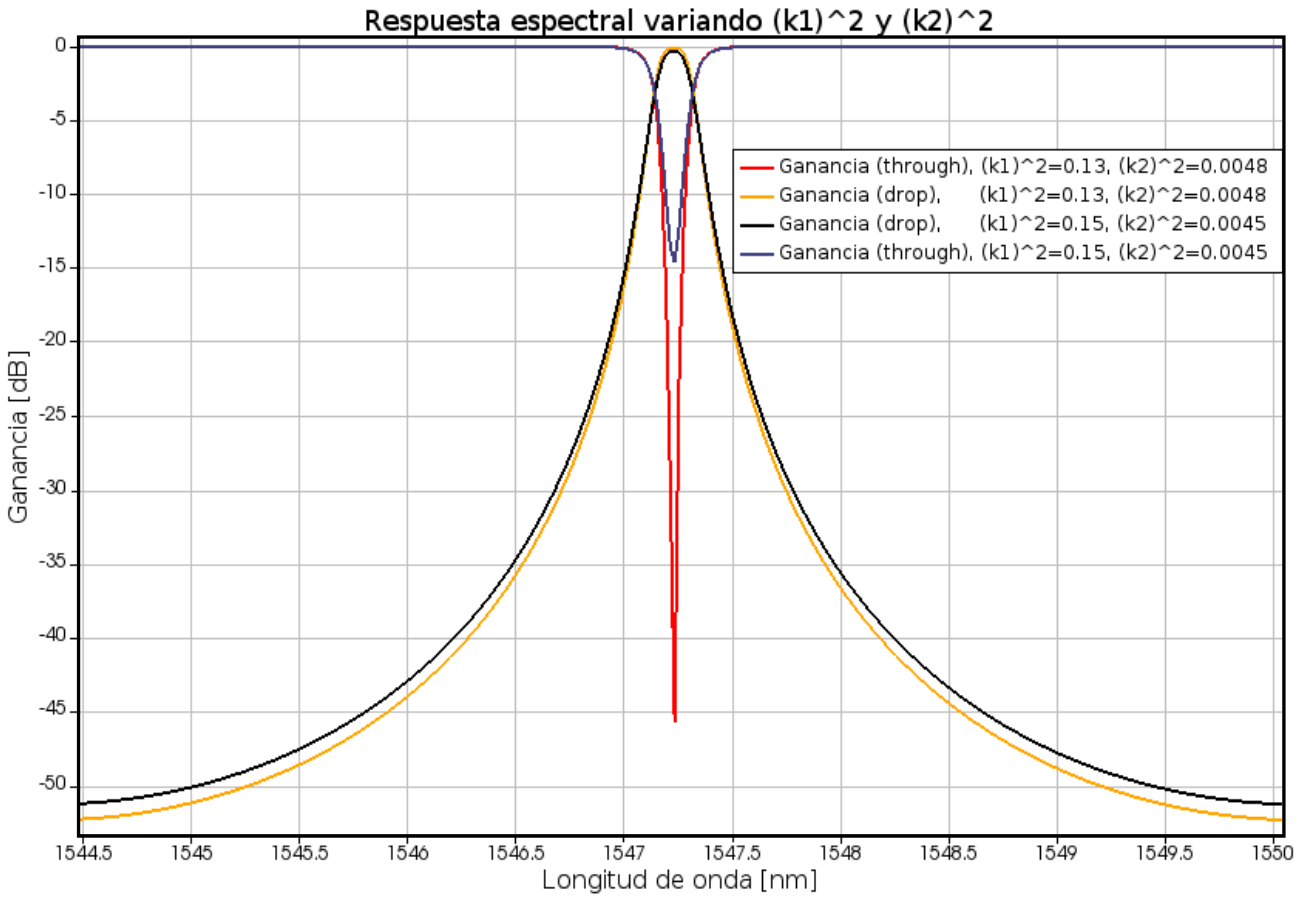


Figura 8.32: Optimización de los coeficientes de acoplamiento κ_1^2 y κ_2^2. El puerto *through* (rojo) y el *drop* (naranja) con κ_1^2=0.13 y κ_2^2=0.0048, presentaron el mejor espectro de ganancia.

En el mismo modelo compacto en INTERCONNECT, se adaptan los dos sintonizadores térmicos (uno para cada anillo), y se establecen los parámetros κ_1^2 y κ_2^2 previamente calculados. Entonces se realiza un barrido incrementando el voltaje, y en consecuencia la temperatura a través de los calentadores también aumentará. Con esto obtenemos una longitud de onda resonante en 1550 nm, este efecto se puede observar en la Figura 8.33 para el puerto *drop* y Figura 8.34 para el puerto *through*, ambas con línea de color azul, en donde suponemos una eficiencia de sintonización de 0.1 nm/V^2 de los calentadores. En ambas figuras se puede observar que se logró desfasar λ desde 1547.6 nm hasta 1550 nm, con una tensión inicial de 4.1 V hasta 6.4 V aplicada en los *bond pads* que se conectan los calentadores de los anillos.

Luego, se repite el barrido de los coeficientes de acoplamiento para verificar que la aplicación del voltaje que llevo a λ a una resonancia en 1550 nm, no cambie la optimización de los coeficientes para este diseño. En este caso se pudo observar que los voltajes aplicados no degradaron las ganancias espectrales de los coeficientes

de optimizados.

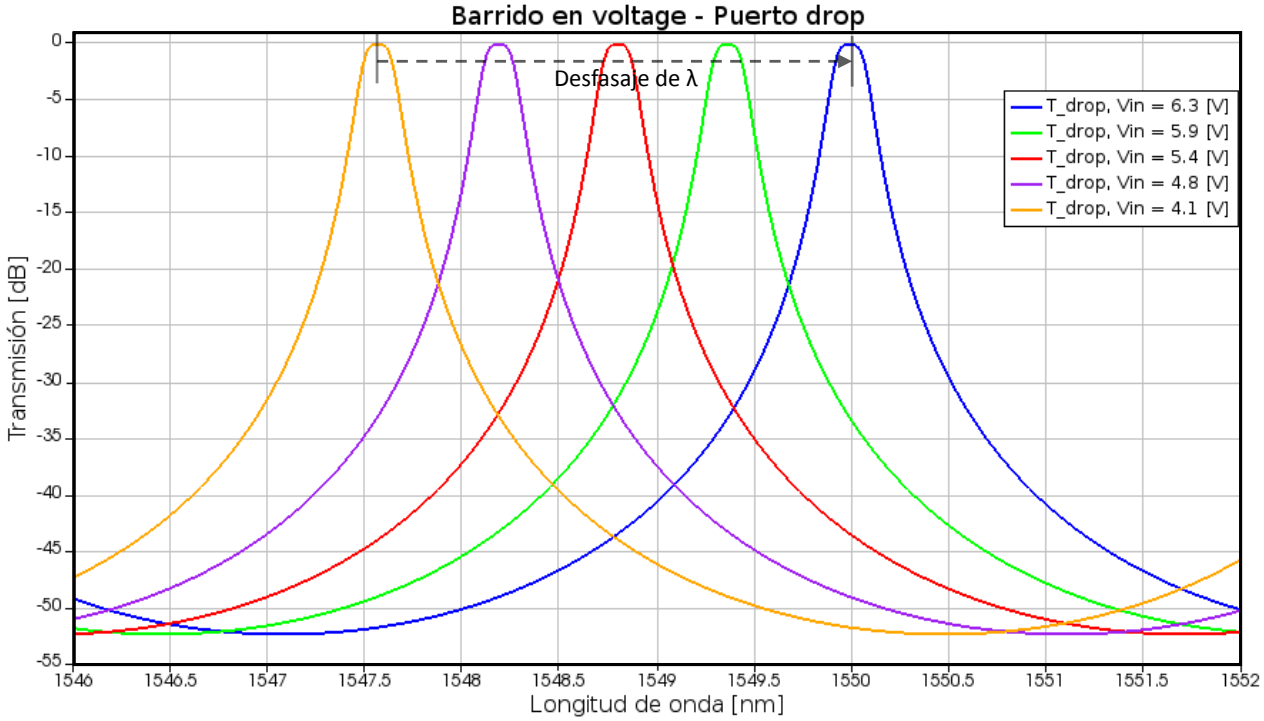


Figura 8.33: Espectros del puerto *drop* variando el voltaje aplicado.

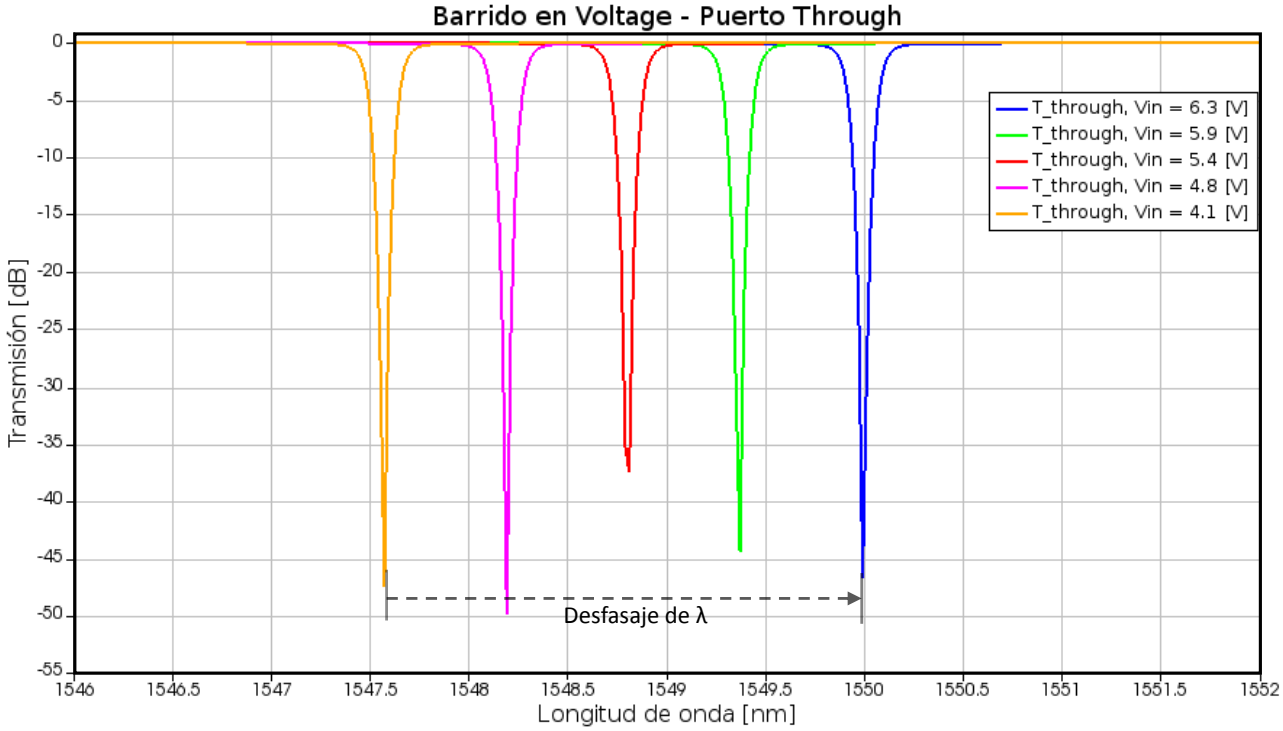


Figura 8.34: Espectros del puerto *through* variando el voltaje aplicado.

Por último, se utilizaron simulaciones FDTD (Figura 8.35) en las regiones de acoplamiento para determinar las distancias de separación óptima para el acoplamiento y con alta precisión, a partir de los coeficientes de acoplamiento optimizados κ_1^2 y κ_2^2, previamente calculados.

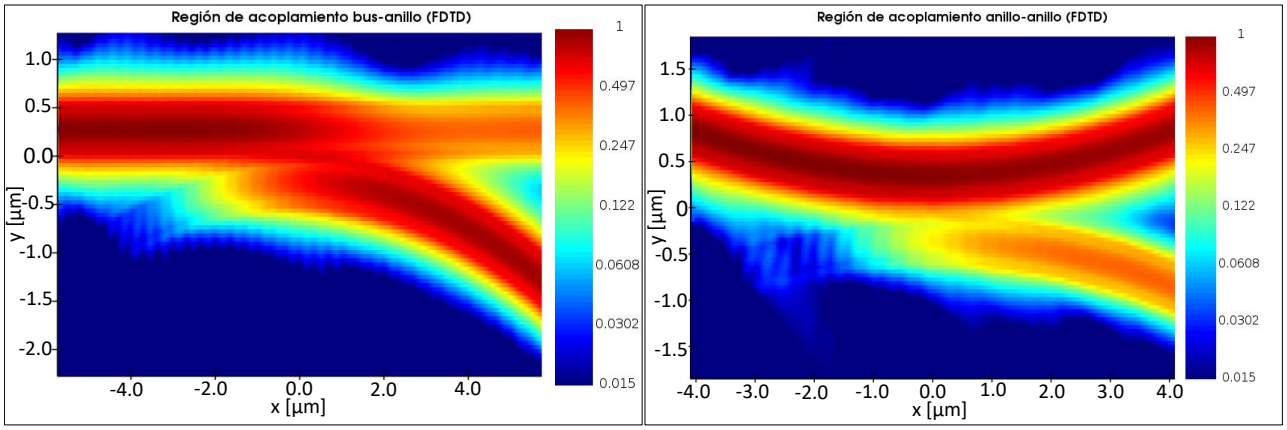


Figura 8.35: Simulación 3D-FDTD en las regiones de acoplamiento bus-anillo (izquierda) y anillo-anillo (derecha).

Las simulaciones 3D FDTD de alta precisión (malla de alta densidad en la región de simulación), es necesaria en esta etapa de diseño del CROW. Se hace este análisis riguroso, debido a la alta sensibilidad que presentan las longitudes de resonancia deseadas, en el gap de las regiones de acoplamiento y también por las tolerancias en los procesos fabricación. Por lo tanto se realizó un barrido del gap entre el bus y el anillo inyectando el coeficiente de acoplamiento $\sqrt{\kappa_1^2}$, y un barrido del gap entre ambos anillos inyectando el coeficiente de acoplamiento $\sqrt{\kappa_2^2}$. Los coeficientes κ_1 y κ_2 son los valores objetivo para determinar los gaps que producen el acoplamiento deseado, que fue previamente optimizado. Los resultados obtenidos (ver Figura 8.36) son: gap_1=305 nm para κ_1=0.361 (bus-anillo), gap_2=632 nm para κ_2= 0.069(anillo-anillo), en donde los valores de κ_1 y κ_2 coinciden con $|S|$, donde $|S|$ representa el módulo de los parámetros de transmisión o acoplamiento de luz (como S_{41}), obtenidos entre regiones anillo-anillo y bus-anillo en función del gap.

Los cálculos se hicieron tomando en cuenta, la relación desde el puerto de entrada (input) hasta el puerto de salida (drop) S_{41} para las regiones bus-anillo y anillo-anillo, los mismos fueron tomados de la matriz S de dispersión (o transferencia). Luego se realiza una interpolación entre los coeficientes de acoplamiento y los gap barridos para ajustar los datos a la longitud de onda central y para distintas configuraciones (malla gruesa o de alta precisión).

Con estos últimos dos cálculos, se completan los parámetros de diseño ne-

cesarios para implementar un CROW, y queda todo listo su posterior *layout* y fabricación.

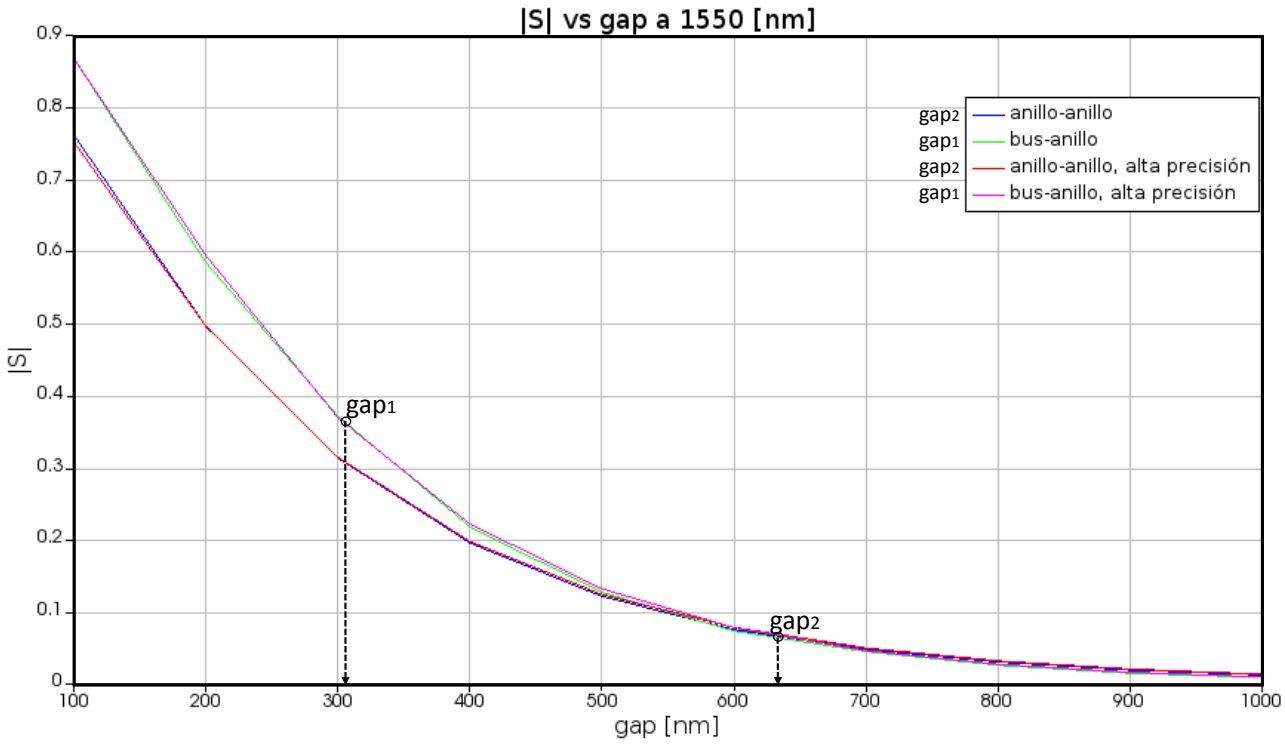


Figura 8.36: $|S|$ vs gap. Se optimizó el gap_1 y gap_2 con simulaciones 3D FDTD para las regiones de acoplamiento bus-anillo y anillo-anillo.

8.2.4. Introducción a los espectrómetros fotónicos integrados

En los últimos años, el interés por desarrollar sistemas compactos lab-on-a-chip está aumentando considerablemente [20] [21]. Existe una necesidad creciente por generar espectrómetros integrados que puedan realizar sensado biológico y ambiental [22]. Los espectrómetros de guía de ondas planares, como los *Arrayed Waveguide Gratings* (AWGs), son componentes esenciales en las redes de comunicación multiplexadas por división de longitud de onda (WDM), y han sido investigados durante varios años por este campo tecnológico [23]. En la actualidad, el multiplexor por división de longitud de onda (WDM) basado en silicio tiene principalmente cuatro estructuras: red de difracción grabada (*Etched Diffraction Grating*, EDG) [24] [25], resonador de micro-anillo (MRR) [26] [27], interferómetro Mach Zender (MZI) [28] [29] y red de guías de onda en matriz (Arrayed Waveguide Grating, AWG) [30]. En comparación con otras tecnologías para filtros ópticos multipuerto, los AWG son compactos, robustos y adecuados para producciones de gran volumen [31].

Los espectrómetros pueden identificar los componentes de una muestra mediante la detección de la absorción o reflexión de la luz [32] [33], así como identificar sustancias específicas al monitorear la intensidad en longitudes de onda conocidas [34], desempeñan un papel crucial en aplicaciones de monitoreo ambiental [35], detección química [36], producción industrial y agrícola [37], diagnóstico médico [38] [39] y exploración astronómica [40] [41].

Los espectrómetros comerciales convencionales están compuestos principalmente por componentes discretos, como redes dispersivas, filtros sintonizables y fotodetectores [42]. Sin embargo, estos componentes suelen ser muy voluminosos y costosos.

Además, se han demostrado dispositivos espectrómetros integrados para una amplia gama de aplicaciones [23] [43] [44] [45] [46], pero estos dispositivos suelen tener una resolución espectral limitada.

Un espectrómetro en un chip fotónico para la detección de múltiples gases, tiene aplicaciones potenciales para la detección espectroscópica portátil. La integración de múltiples capacidades de detección de gases en una sola plataforma, puede ofrecer un sensor integrado que puede superar las limitaciones de los sensores de gas tradicionales, que a menudo requieren dispositivos separados para cada gas y pueden tener problemas de interferencia cruzada [47]. Las capacidades ofrecidas en una única plataforma (como la tecnología silicio), brindan importantes ventajas en términos de compacidad, bajo consumo de energía, confiabilidad e integración híbrida [48].

Los AWG, anillos resonadores y sintonizadores térmicos basados en SOI, también ofrecen bajas pérdidas de inserción y *crosstalk* en el infrarrojo cercano (NIR) y medio (MIR) [49] [50] [51] [52], además, el tamaño del dispositivo se puede reducir drásticamente. Al aprovechar las propiedades únicas de los AWG y la sensibilidad de la banda NIR, el espectrómetro propuesto puede proporcionar una detección precisa de gases en tiempo real.

Los procesos de fabricación CMOS, especialmente en la plataforma SOI, permiten la producción en masa de espectrómetros en chip a bajo costo. Bajo esta tecnología, es posible fabricar espectrómetro compactos con muchos canales y con alta resolución espectral, gracias alto índice de contraste que presenta la tecnología del SOI [53].

Por todas las ventajas mencionadas anteriormente, en este trabajo se propone desarrollar un sensor integrado que utiliza a los AWGs como elemento central de este dispositivo. Estas guías de ondas dispersivas, en combinación con anillos resonadores y desfasadores térmicos, se pueden diseñar para ajustarse a las diferentes

sensibilidades de absorción de los gases objetivo, lo que posibilita la detección e identificación simultánea de varios elementos. El espectrómetro propuesto está sintonizado para la detección de gases en la banda del infrarrojo cercano (NIR), pero puede ajustarse y diseñarse para bandas aún más alejadas como la banda MIR. Se discutirán los mecanismos de detección correspondientes a los gases de efecto invernadero en el desarrollo de este sensor integrado.

Principio de funcionamiento: La manera más sencilla de entender como funciona el sensor espectroscópico propuesto, es mediante una topología sencilla que combina un anillo resonador (MRR) y un demultiplexor (AWG) de 8 canales, así como se muestra en la Figura 8.37. El espectro de entrada ingresa a través del bus y parte de ese espectro es filtrado por el anillo resonador (MRR), mientras que el resto del espectro se mantiene en el bus hasta atravesar el puerto *through* del anillo. Por otra lado, las longitudes de onda que fueron filtradas $(\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_n)$, atraviesan en serie el puerto *drop* del MRR e ingresan al AWG 1x8. Luego, el AWG mediante cada una de sus etapas, se encarga de la separación espacial de las longitudes de onda, que finalmente salen a través de los 8 canales de salida del AWG en paralelo, con una mejor resolución espectral a la que se lograría utilizando únicamente el AWG para la demultiplexación. Esto se debe a la capacidad de los MRR de seleccionar longitudes de onda con un ancho espectral reducido.

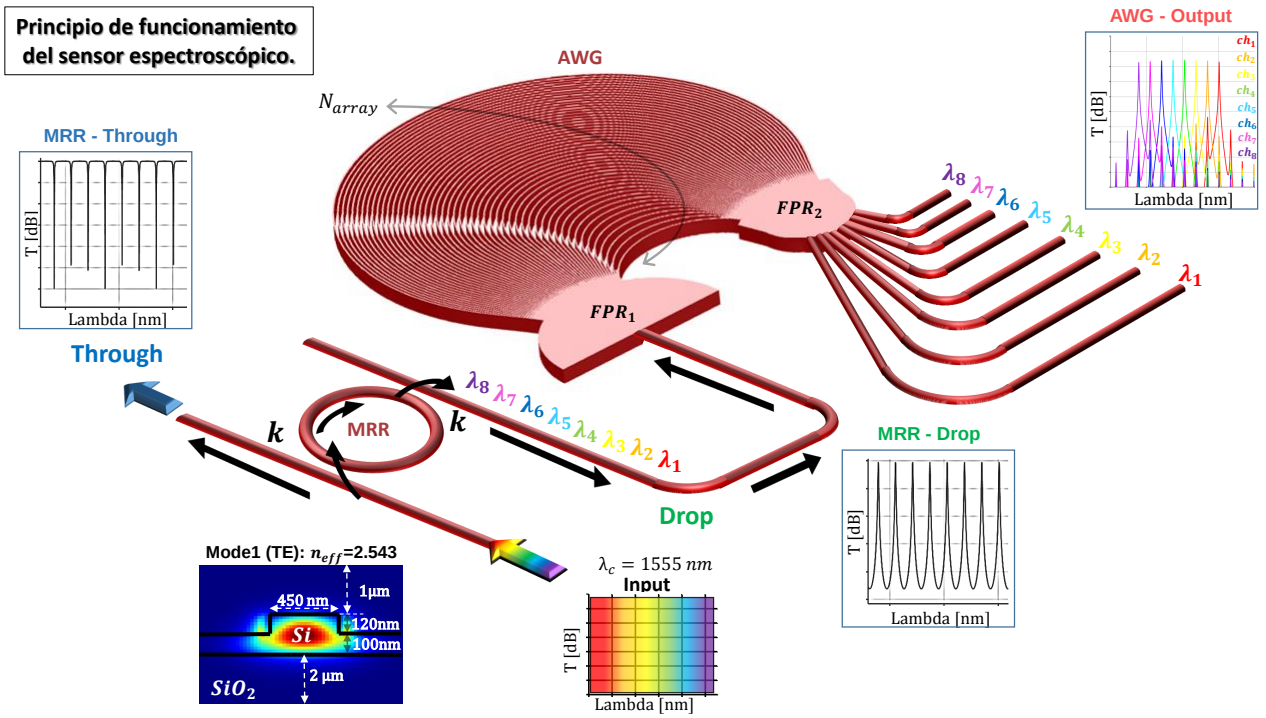


Figura 8.37: Principio de funcionamiento del espectrómetro integrado basado en un anillo resonador y un AWG.

Esta topología sencilla, es el punto de partida para el escalar el sensor espectroscópico a uno con más canales de salida y mejorando su resolución espectral. Esto mediante una nueva topología que combina doble-anillos resonadores (CROWs), desfasadores térmicos (*shifters*) y AWGs, como se explicará a continuación.

Espectrómetro integrado de alta resolución: El espectrómetro integrado esta conformado por varios sub-sistemas que en conjunto, logran demultiplexar con alta resolución el espectro de entrada (figura 8.38). La primera etapa consiste en una configuración de 5 filtros de doble anillo resonador-CROW. Cada filtro tiene sus propios calentadores (desfasador térmico), los cuales tienen aplicadas distintas tensiones por cada uno de los CROWs. Sin embargo, los dos anillos que forman cada CROW tienen la misma tensión aplicada para estabilizar el filtrado de longitud de onda deseada. Los CROWs se encuentran interconectados a través de sus puertos *through*, por este bus el espectro de entrada puede desplazarse de un extremo al otro en el chip. Cada uno de los filtros CROWs recibe una serie de longitudes de onda λ_n a través del bus *through*, y cada serie de las λ_n es diferente para cada CROW.

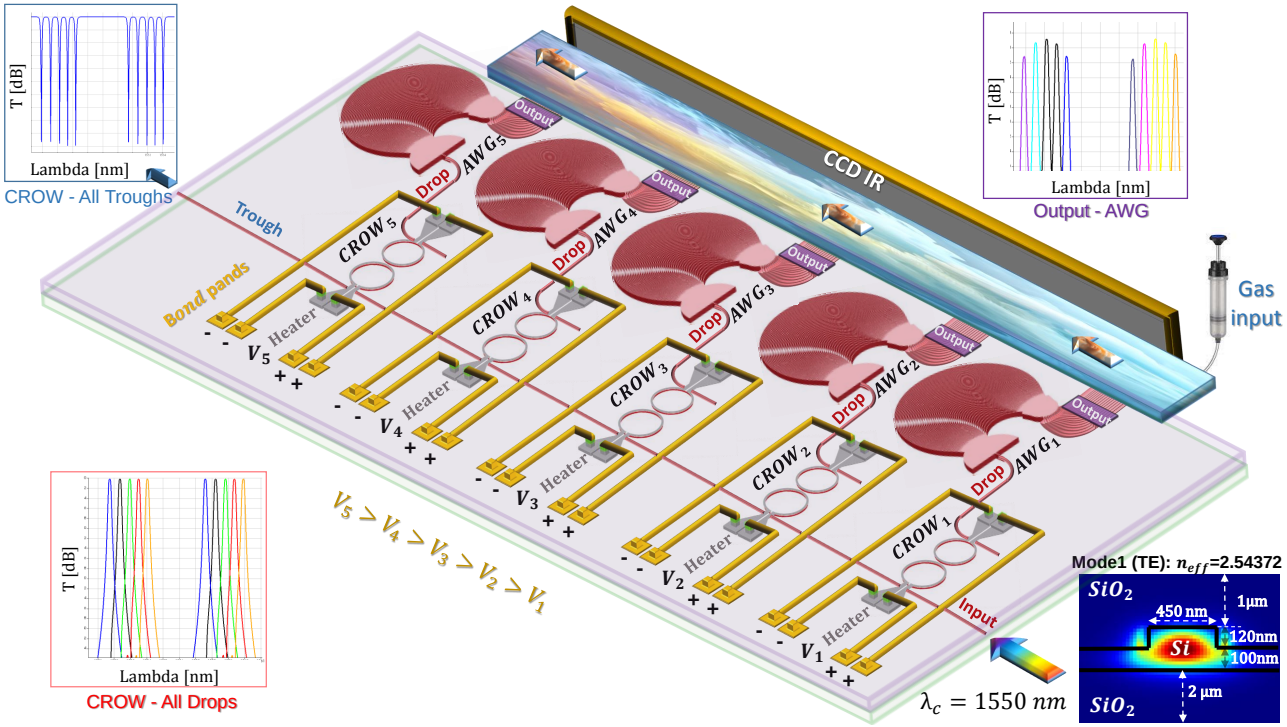


Figura 8.38: Esquema del espectrómetro integrado basado en anillos resonadores CROW con desfasadores térmicos y demultiplexores de longitud de onda (AWG).

Luego, en una segunda etapa, se implementan 5 AWGs conectados a través del puerto *drop* de cada uno de los CROWs. Los AWGs reciben cada una de las series

de longitudes de onda (λ_n) que fueron tomadas inicialmente por cada CROW desde el puerto de *trough*. En esta etapa del diseño, es fundamental lograr que el *free spectral range* (FSR) de cada CROW sea estrictamente consistente con el espaciado de longitud de onda de los canales de salida de cada AWG, esto se logra mediante los sintonizadores térmicos, que permiten que el pico de resonancia de los λ_n filtrados por cada CROW, coincidan con el espaciado en las salidas de cada AWG.

En esta segunda etapa del sistema, logramos demultiplexar cada una de las series de λ_n, con una resolución espectral de 0.6 nm y un total de 80 canales de salida entre todos los AWGs. A través de esta configuración en el diseño, cada CROW funcionó como un filtro para darle forma a la región del lóbulo lateral del AWG, y el *crosstalk* del dispositivo se pudo reducir significativamente con un pequeño cambio en las pérdidas por inserción. El diseño de este sistema, permite ajustar el espaciado espectral modificando las dimensiones de los anillos resonadores, esto es un aspecto clave para la fabricación del espectrómetro. Los procesos litográficos pueden ingresar geometrías indeseadas en el diseño y afectar la *performance* del sistema, principalmente por la alta sensibilidad que tienen los anillos resonadores, este ajuste lo discutiremos en las siguientes secciones.

8.2.5. Diseño de espectrómetros con bajo *crosstalk* basados en AWGs y filtros de anillos resonadores.

El esquema del espectrómetro basado en CROWs y AWGs de bajo *crosstalk* se muestra en la Figura 8.38, está conformado principalmente de: un CROW con calentadores (ajusta la fase del λ filtrado) y un AWG. El puerto drop del CROW está conectado a la guía de onda de entrada del AWG. Para garantizar que el pico de resonancia del CROW se ajuste estrictamente con la respuesta espectral del AWG, es fundamental y riguroso el diseño del FSR del CROW y el espaciado de longitud de onda del canal del AWG.

Los requerimientos de diseño del AWG se determinan a partir de la longitud de onda central $\lambda_c = 1550$nm, espaciado de canales $\Delta\lambda = 6$nm, y el número de canales $N_{ch} = 16$. Mediante simulaciones basadas cálculo de auto-modos (Lumerical MODE), se computaron los índices efectivos de la guías de onda $n_{eff_w} = 2{,}544$, índice efectivo del grupo $n_{g_w} = 3{,}858$ y índice efectivo en región libre de propagación (*slab*) $n_s = 2{,}848$ para el modo TE en guías de onda del tipo RIB con las dimensiones de la Figura 8.30. La estructura de estas guías tienen una altura de cresta (slab) de 100 nm, el ancho de la cresta es de 450 nm y la altura de la guía de onda es de 220 nm.

El método integral de superposición (descrito en la sección 3.4.7), se utiliza para estimar el *crosstalk* entre guías de onda en el arreglo de guías de onda del AWG. Este método permite calcular la interacción entre las guías de onda y, por lo tanto, determinar el espaciado óptimo entre ellas para minimizar el *crosstalk*. Se determinó el espaciado entre las guías de onda de salida $d_r = 1{,}25\mu$m, el espaciado entre las guías de onda del array $d_a = 0{,}7\mu$m, orden de difracción $m = 10$, se calculó la diferencia de longitud de la guía de ondas del conjunto $\Delta L = 6{,}1\mu$m, y el radio de la circulo de Rowland $R_a = 27{,}5\mu$m.

Por otro lado, el diseño del par de microanillos-CROW es la clave del dispositivo. Las dimensiones, parámetros y optimización del CROW, junto a las especificaciones del desfasador térmico, son las mismas del sistema desarrollado en la sección 8.2.3, y lo combinamos con el AWG previamente descrito en el párrafo anterior.

La estructura de las guía de onda de los micro-anillos adoptan la misma geometría de las guías de onda tipo RIB del AWG, por lo tanto los indices efectivos coinciden. Además se calcularon los índices efectivos en las curvas de los anillos $n_{eff_b} = 2{,}545$, $n_{g_b} = 3{,}856$, y observamos que los valores muy parecidos a los calculados en las guías de onda rectas, para simplificar, utilizamos el índice efectivo n_{eff_w} para guías de onda rectas y curvas.

En la Figura 8.39 se presentan las simulaciones de las respuestas espectrales de 3 sistemas demultiplexores independientes: doble anillo resonador CROW + AWG (línea continua azul), un micro-anillo resonador MRR + AWG (línea discontinua magenta) y un AWG solo (línea discontinua negra). Se puede observar que los lóbulos laterales del CROW+AWG presentan un ancho modal más fino respecto de una configuración un MRR+AWG, y aún más fino respecto de un AWG solo. Entonces, la ventaja de implementar un CROW en la entrada del AWG, permite mejorar enormemente la resolución espectral en la demultiplexación a la salida del sistema. A continuación se explica esta característica en estos dispositivos.

El ancho modal de un AWG fue introducido en la sección 3.4.7 y en la sección 8.1.4 se profundizó sobre las limitaciones que tiene este demultiplexor para lograr un lóbulo lateral filtrado con bajo *crosstalk* mediante el barrido de los parámetros más relevantes como la cantidad de N_{arrays}, orden m del AWG, ancho w de las guías de onda, el espaciado espectral entre canales $\Delta\lambda$ y la distancia d_a entre guías de onda. Resumidamente, podemos decir el incremento de alguno de estos parámetros es proporcional a estrechar el lóbulo lateral a la salida del AWG, ya que en la mayoría de casos, se logra mejorar la interferencia constructiva en la región de propagación libre de salida 2, y en consecuencia la resolución espectral,

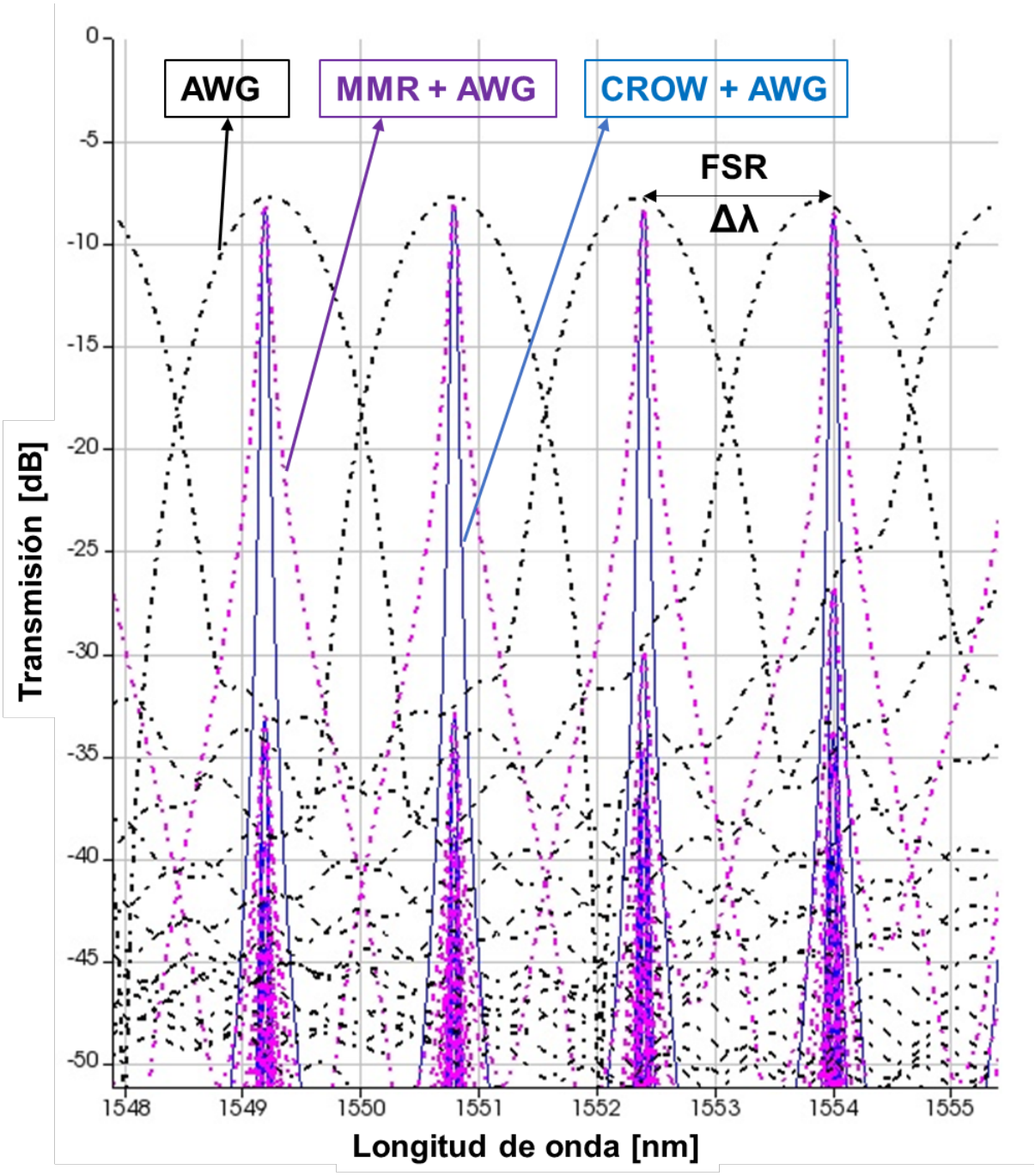


Figura 8.39: Espectros de transmisión de: AWG convencional, filtro MRR + AWG, filtro CROW + AWG.

sin embargo, se observó que incrementar demasiado alguno de estos parámetros no es posible y tiene limitaciones, en primer lugar porque puede crecer considerablemente el área final del dispositivo, y segundo, porque empiezan a generarse pérdidas excesivas en alguna de las etapas del AWG, lo que puede degradar totalmente la respuesta del sistema demultiplexor.

Por otro lado, en un anillo resonador, el ancho espectral o ancho de banda $\Delta\lambda$

de la resonancia, se define como el ancho de banda a media potencia (FWHM, *Full Width at Half Maximum*). Este parámetro está determinado por el factor de calidad Q del resonador, el cual mide cuán eficientemente el resonador puede confinar una onda de luz. El factor Q está relacionado con las pérdidas en el resonador, a menores pérdidas resulta un mayor factor Q y un ancho espectral más estrecho.

Un anillo resonador con un alto Q tiene un ancho modal estrecho porque la luz se confina en el resonador durante un mayor número de ciclos. Esto implica que el resonador filtra selectivamente una banda estrecha de longitudes de onda, o sea que también puede verse como una medida de su selectividad espectral y está relacionado con el ancho de banda del resonador. Heebner y otros, [54], muestran que esta relación se define como:

$$Q = \frac{\lambda_c}{\Delta\lambda} \tag{8.26}$$

despejando se obtiene que $\Delta\lambda$:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_c}{Q} \tag{8.27}$$

y el factor Q se puede expresarme simplificadamente como:

$$Q = \frac{2\pi n_{\text{eff}} L}{\lambda(1 - at)} \tag{8.28}$$

- Q: Factor de calidad del resonador.
- n_{eff}: Índice efectivo del modo en el resonador.
- L: Longitud del perímetro del resonador.
- λ: Longitud de onda de operación.
- a: Coeficiente de atenuación o pérdida de amplitud en el anillo (relacionado con las pérdidas internas).
- t: es el coeficiente de transmisión del acoplador.

Por lo tanto, el ancho espectral o de banda de un anillo resonador es más estrecho que el de un AWG, debido a las diferencias en los mecanismos de resonancia y distribución que presentan ambos dispositivos. El anillo resonador presenta un ancho espectral más estrecho por su alta selectividad, esto se debe a las múltiples vueltas de la luz dentro del anillo, acumulando fase y permitiendo un filtrado muy

selectivo. Por otro lado, el ancho espectral de un AWG está determinado por los parámetros geométricos, y aunque puede ser afinado, es más ancho comparado con los anillos resonadores, debido a la naturaleza menos selectiva que presenta la interferencia de sus múltiples caminos.

Por último un CROW de doble anillo, presenta un ancho espectral más estrecho respecto de un solo anillo, porque puede proporcionar un mayor control sobre las propiedades de transmisión y reflexión de la estructura debido a la interferencia constructiva y destructiva entre los anillos [11]. En un resonador de anillo simple, la resonancia ocurre cuando la condición de fase ϕ=2πm (donde m es un número entero) [54], lo que produce picos de transmisión en esas frecuencias específicas. En un CROW, las resonancias de los dos anillos pueden interferir constructivamente (reforzando la transmisión) o destructivamente (cancelándola), lo que afina más la resonancia, permitiendo así a una mayor selectividad espectral y en consecuencia un ancho espectral más estrecho, en comparación con un solo anillo.

El ancho espectral o ancho de banda de un resonador, está determinado por el factor de calidad Q y la separación entre los modos resonantes. Un Q más alto implica un ancho de banda más estrecho. En un CROW, la interferencia entre los anillos puede aumentar el factor Q efectivo del sistema, afinando aún más ancho espectral respecto de un solo anillo. Esto es fácil ver usando la ecuación 8.27, en donde el ancho espectral disminuye a medida se Q incrementa.

Resultados.

Los espectros NIR vistos en la sección 2.3, proporcionan información química y física sobre una muestra. La radiación infrarroja cercana NIR (780-2500 nm) excita frecuencias vibratorias de las moléculas sin re-emisión de luz, permitiendo la absorción de frecuencias que corresponden a transiciones vibracionales moleculares. Este principio se aprovecha en el diseño del espectrómetro fotónico en SOI para detectar y analizar picos de absorción característicos de las sustancias en estudio, en un rango de 1500 nm a 1600 nm. En este rango espectral es posible identificar, picos de absorción de gases de efecto invernadero como: el dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso N_2O y vapor de agua H_20.

En base a la Figura 8.38, podemos observar que el espectrómetro integrado, esta compuesto por una serie de subsistemas, que en conjunto logran una demultiplexación con alta resolución. La ruta del espectro, inicia a través del puerto *input* del chip. El $CROW_1$ con calentadores filtra una serie de frecuencias λ_n con un FSR=5.8 nm, luego, atraviesan los dos anillos del $CROW_1$ y a la salida en el puerto *drop*, presentan un lóbulo lateral afinado, por las características de los

resonadores previamente descritas. La trayectoria continua a través de este puerto que se encuentra conectado a la entrada del AWG_1. Los λ_n se propagan a través del AWG 1x16 canales, que se encarga de separarlos espacialmente con un ancho modal muy estrecho. Para garantizar que el pico de resonancia del CROW se ajuste precisamente con la respuesta espectral del AWG, es esencial y riguroso el diseño del FSR del CROW y el espaciado de longitud de onda del canal del AWG.

Luego, el espectro de entrada que no fue filtrado por el 1er CROW, llega al $CROW_2$, que además, tiene los mismos parámetros geométricos del $CROW_1$. Entonces, el $CROW_2$ va a intentar tomar los mismos λ_n que filtro el $CROW_1$ por la geometría y naturaleza que presenta. Es ahí cuando los calentadores entran en juego. Mediante la aplicación de un tensión V_{in} en los *bond pads*, una resistencia metálica que yace en el *cladding* a una distancia de ≈ 1 μm sobre los anillos, se calienta y mediante el efecto termo-óptico se logra cambiar la fase del espectro entrada. De esta manera el $CROW_2$ puede tomar otro conjunto de longitudes de onda, que son enviadas al demultiplexor AWG_2 y una vez más, esta serie de longitudes de onda son separados espacialmente.

Esta proceso se repite para el resto de CROWs Y AWGs. Los calentadores se sintonizan aumentando la tensión V_{in}, de tal manera que cada CROW tome un conjunto de longitudes de onda diferentes a medida que el espectro avanza a través del chip. En la práctica, podemos interrogar los espectros filtrados, colocando un analizador de espectros ópticos (OSA) en el puerto *through* de salida en el borde del chip, si las fases no se adaptan al gas objetivo, se puede inyectar mas o menos calor en los desfasadores térmicos, hasta ecualizar las fases deseadas. El número de canales demultiplexados, dependerá de la cantidad de AWGs y cantidad de canales de salida, del ancho modal de las frecuencias filtradas y el *crosstalk* entre canales vecinos a la salida del AWG.

Finalmente, se presentan los resultados de la topología AWG + CROW con sus parámetros de diseño previamente descritos, mediante los cuales se obtuvo un espectrómetro integrado de alta resolución en la banda NIR, para la detección de gases de efecto invernadero como el vapor de agua H_20, el dióxido de carbono $C0_2$ y el óxido nitroso N_20. En primer lugar, de la Figura 8.40 se observan los picos de absorción de estos gases en la banda NIR entre 1.5μm y 1.6μm. El objetivo de este dispositivo es detectar las bandas de absorción de los gases previamente mencionados. Por lo tanto, en la Figura 8.42(color magenta) se presenta la respuesta espectral de haber inyectado al espectrómetro integrado, con una fuente en la banda NIR entre de 1.5 μm y 1.6 μm. Se obtuvieron 80 canales de salida

(empleando 5 AWGs de 16 canales) de alta resolución. En la Figura 8.41, se hace un zoom en la región central del espectro. Se observa que cada canal espectral, tiene un ancho total a la mitad del máximo (FWHM) de 0,35 nm y están espaciados a 0,65 nm. Además, el dispositivo presenta una pérdida de inserción de -8,77 [dB] y un *crosstalk* con el canal vecino en el canal central de -20,34 [dB].

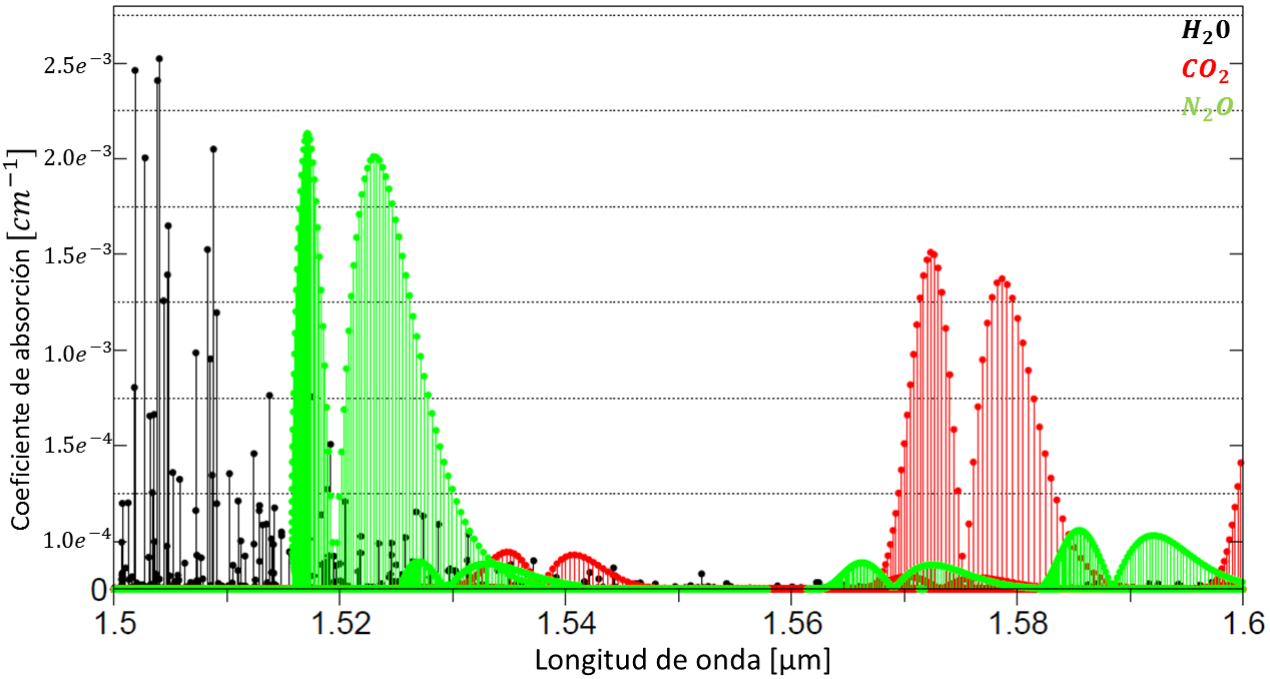


Figura 8.40: Espectro de absorción de gases de efecto invernadero entre 1.5μm y 1.6μm de la banda NIR. Fuente: Base de datos de HITRAN2020.

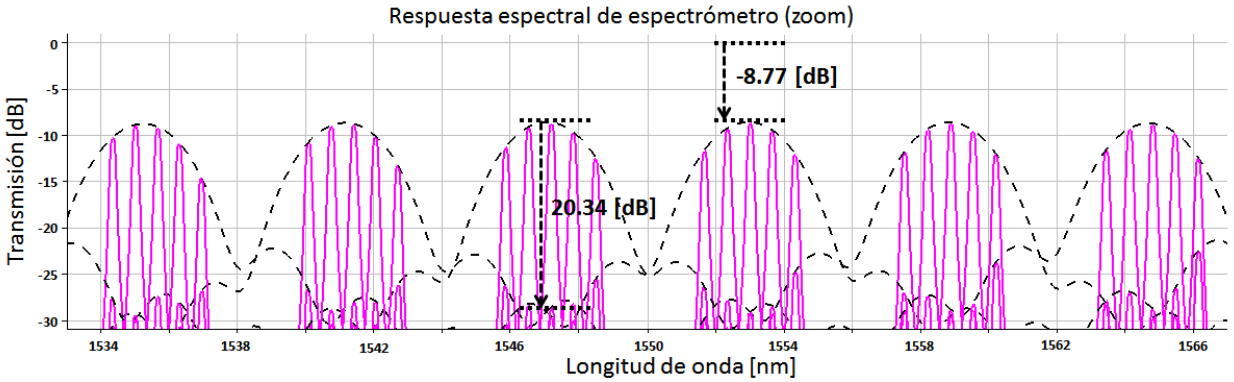


Figura 8.41: Pérdidas de inserción y *crosstalk* del canal vecino en el canal central.

Finalmente, en la Figura 8.42, se puede observar que los canales de salida del espectrómetro se pueden ajustar mediante los desfasadores térmicos (calentadores), y sintonizarlos con las bandas de absorción de los gases objetivo.

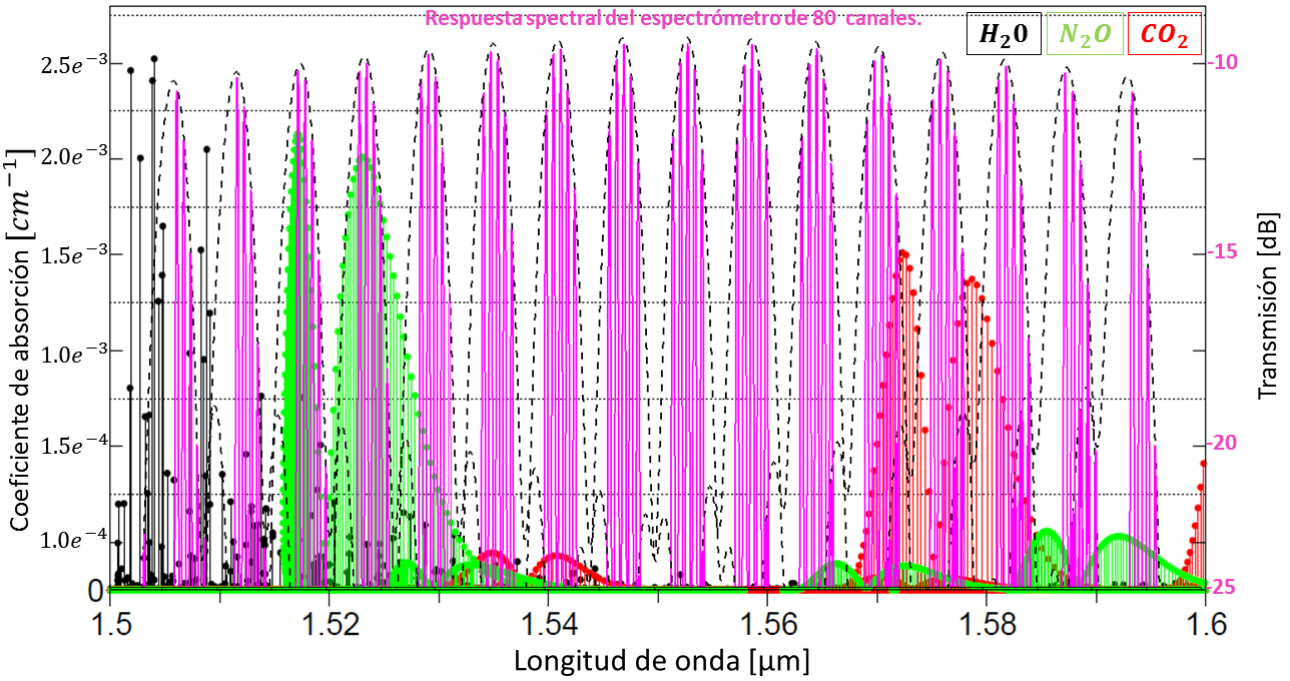


Figura 8.42: Respuesta espectral del espectrómetro integrado de 80 canales propuesto, frente a los espectros de absorción de 3 gases de efecto invernadero.

Los resultados mostrados en la Figura 8.41 indican que el espectro de entrada aún presenta áreas que pueden ser utilizadas para la demultiplexación. Esto sugiere que es posible incrementar el número de canales de salida, mejorando así la resolución y la capacidad de detección del sistema. La versatilidad de este sistema radica en que puede ser escalado utilizando las mismas geometrías en cada bloque demultiplexor (1 CROW + 1 AWG), a costas de aumentar el tamaño final del dispositivo y la cantidad de calentadores. Esta escalabilidad dependerá de la aplicación específica y de la resolución deseada.

Por lo mencionado anteriormente, se escaló el espectrómetro integrado. El nuevo diseño está compuesto por 9 CROWs y 9 AWGs, logrando un total de 144 canales de salida. Para su diseño, se utilizaron las mismas características geométricas en los CROWs y AWGs del espectrómetro previamente desarrollado de 80 canales.

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 8.43. Además, la Figura 8.44 muestra las pérdidas de inserción y el *crosstalk* del canal vecino en el canal central, del espectrómetro de 144 canales y se observa que son iguales a las pérdidas del espectrómetro de 80 canales. Esto es significativo porque la adición de más dispositivos no degradó el rendimiento del sistema. En la Figura 8.45, se puede ver como la capacidad de detección de gases del espectrómetro de 144 canales ha

mejorado, ya que ahora puede cubrir un mayor número de picos de absorción.

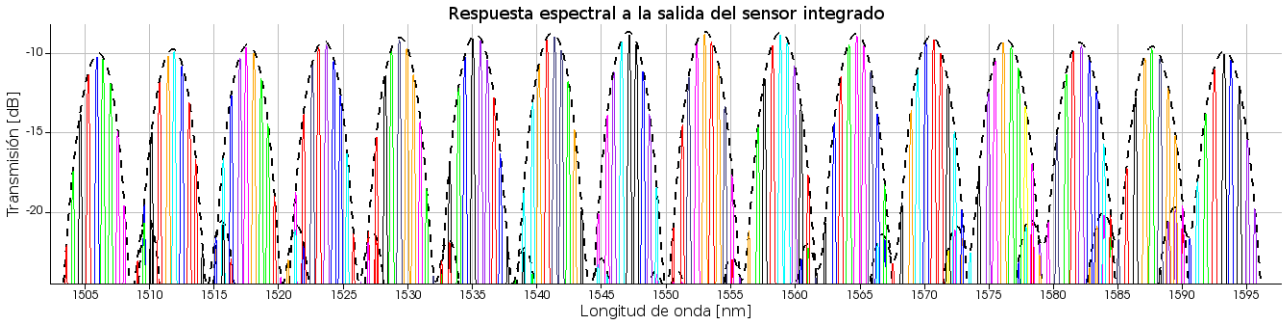


Figura 8.43: Respuesta espectral del espectrómetro integrado de 144 canales.

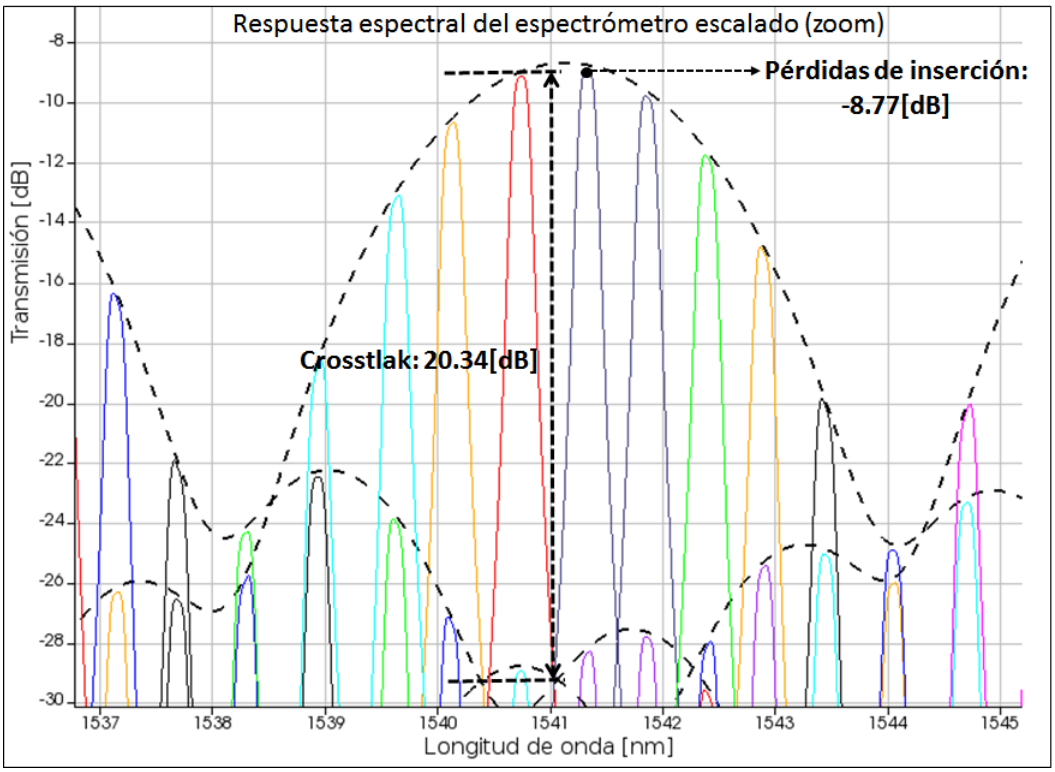


Figura 8.44: Pérdidas de inserción y *crosstalk* del canal vecino en el canal central.

Podemos concluir que el espectrómetro propuesto, ofrece una mejor resolución espectral en comparación con otras configuraciones, como un AWG convencional o una combinación de MRR + AWG. Esta mejora se ha conseguido mediante la implementación de una serie de filtros resonadores CROW junto con los AWG. Además, con el uso de sintonizadores de fase térmicos, se puede ajustar la respuesta espectral de los 80 canales para que coincida con el espectro de absorción de los gases de interés, especialmente gases de efecto invernadero como el vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2) y el óxido nitroso (N_2O).

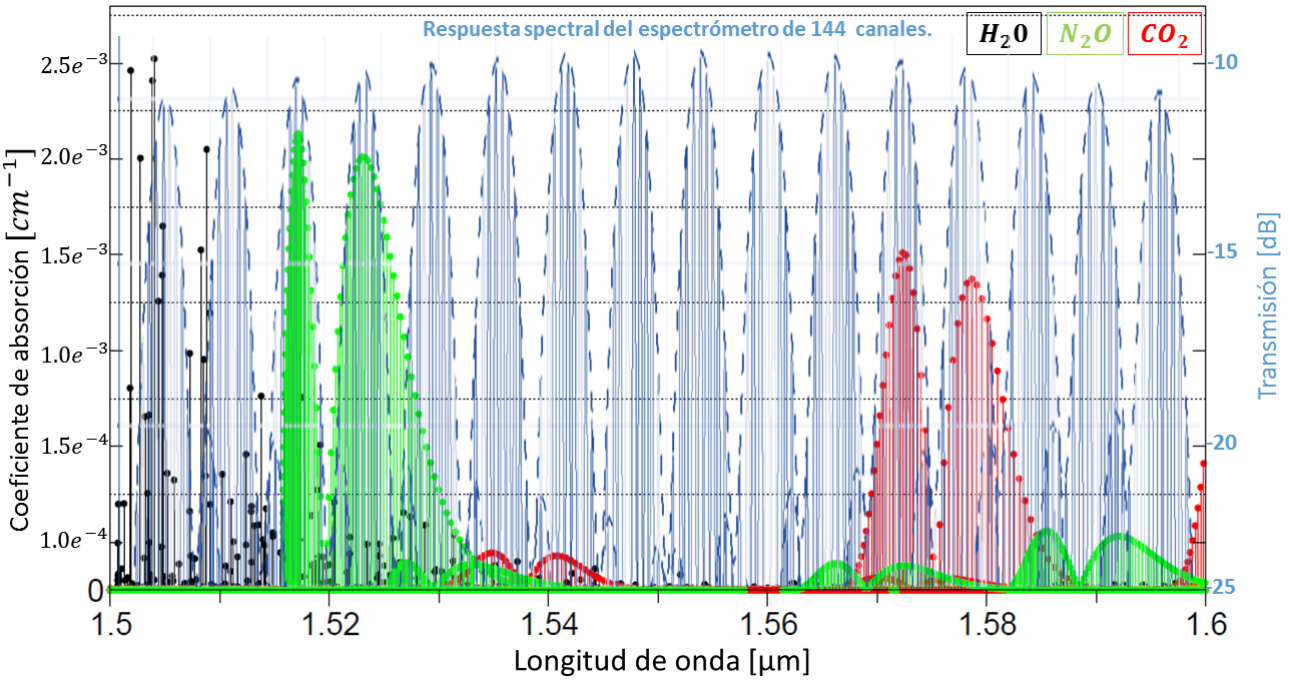


Figura 8.45: Respuesta espectral del espectrómetro integrado de 144 canales propuesto, frente a los espectros de absorción de 3 gases de efecto invernadero.

La configuración propuesta proporciona alta resolución y puede escalarse para mejorar la capacidad de detección, esto, elevando la cantidad de componentes, en donde se demostró un espectrómetro integrado de 144 canales.

La topología propuesta, puede ser de mucho interés y reconfigurada para la detección de gases en la banda de infrarrojo medio (MIR), donde los picos de absorción son más estrechos. Por lo tanto, la versatilidad de la configuración de la serie CROW+AWG, abre nuevas oportunidades para la detección simultánea de múltiples gases de distintas bandas en una sola plataforma integrada.

Por otro lado, al igual que la espectroscopia en el infrarrojo cercano (NIRS) contribuye a la química verde al no utilizar reactivos peligrosos, un espectrómetro fotónico integrado en SOI también puede se ofrece como herramienta ecológica y segura para la detección y análisis de materiales. Esto se alinea con los objetivos de reducir el impacto ambiental y mejorar la sostenibilidad en las prácticas analíticas científicas e industriales.

Referencias

[1] H. Takahashi, I. Nishi e Y. Hibino. «10 GHz spacing optical frequency division multiplexer based on arrayed-waveguide grating». En: *Electron. Lett.* 28.4 (feb. de 1992), págs. 380-382.

[2] Author's Name. «Integrated Optics in Silicon-Based Aluminum Oxide». Tesis doct. Delft Univ. of Technol., 1991. Cap. 6.

[3] C. Dragone. «An N x N optical multiplexer using a planar arrangement of two star couplers». En: *IEEE Photon. Technol. Lett.* 3 (sep. de 1991), págs. 812-815.

[4] Bahaa E. A. Saleh y Malvin Carl Teich. *Fundamentals of Photonics*. 2.ª ed. Wiley-Interscience, 2007.

[5] R. Adar, C. H. Henry y C. Dragone. «Broad-band array multiplexers made with silica waveguides on silicon». En: *Journal of Lightwave Technology* 11 (1993). DOI: https://doi.org/10.1109/50.212529.

[6] M. R. Amersfoort et al. «Phased-array wavelength demultiplexer with flattened wavelength response». En: *Electronics Letters* 30.4 (feb. de 1994), págs. 300-302.

[7] M. R. Amersfoort et al. «Passband broadening of integrated arrayed waveguide filters using multimode interference couplers». En: *Electronics Letters* 32.5 (feb. de 1996), págs. 449-451.

[8] P. Muñoz, D. Pastor y J. Capmany. «Analysis and design of arrayed waveguide gratings with MMI couplers». En: *Optics Express* 9.7 (2001), págs. 328-335.

[9] M. Smit y C. Van Dam. «PHASAR-based WDM-devices: Principles, design and applications». En: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 2.2 (1996), págs. 236-250. DOI: 10.1109/2944.571757.

[10] K. J. Vahala. «Optical microcavities». En: *Nature (London)* 424 (2003), págs. 839-846.

[11] A. Yariv et al. «Coupled-resonator optical waveguide: a proposal and analysis». En: *Optics Letters* 24.11 (1999), págs. 711-713.

[12] J. K. Poon et al. «Designing coupled-resonator optical waveguide delay lines». En: *Journal of the Optical Society of America B* 21.9 (2004), págs. 1665-1673.

[13] K. Oda, N. Takato y H. Toba. «A wide-FSR waveguide double-ring resonator for optical FDM transmission systems». En: *Journal of Lightwave Technology* 9 (1991), págs. 728-736.

[14] J. K. S. Poon et al. «Matrix analysis of microring coupled-resonator optical waveguides». En: *Optics Express* 12 (2004), págs. 90-103. URL: http://www.opticsexpress.org.

[15] B. E. Little et al. «Microring resonator channel dropping filter». En: *Journal of Lightwave Technology* 15 (1997), págs. 998-1005.

[16] C. K. Madsen. «General IIR optical filter design for WDM applications using all-pass filters». En: *Journal of Lightwave Technology* 18 (2000), págs. 860-868.

[17] Xi Xiao, Hao Xu, Xianyao Li et al. «25 Gbit/s silicon microring modulator based on misalignment-tolerant interleaved PN junctions». En: *Optics Express* 20.3 (2012). cit. on p. 226, págs. 2507-2515. DOI: 10.1364/OE.20.002507.

[18] Tom Baehr-Jones, Ran Ding, Ali Ayazi et al. «A 25 Gb/s silicon photonics platform». En: *arXiv* 1203.0767v1 (2012). cit. on pp. 226, 234.

[19] W. Bogaerts, P. De Heyn, T. Van Vaerenbergh et al. «Silicon microring resonators». En: *Laser & Photonics Reviews* (2012). (cit. on p. 115).

[20] YC Lim, Abbas Kouzani y Wei Duan. «Lab-on-a-chip: A component view». En: *Microsystem Technologies* 16 (dic. de 2010), págs. 1995-2015. DOI: 10.1007/s00542-010-1141-6.

[21] Roel Baets et al. «Spectroscopy-on-chip applications of silicon photonics». En: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. Vol. 8627. SPIE, 2013, págs. 86270I-86270I. DOI: 10.1117/12.2010498.

[22] Y. Komai k. Kodate y K.Okamoto. «Compact Spectroscopic sensor using an Arrayed Waveguide Grating». En: *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* 10.4 (2008).

[23] P. Cheben. «Wavelength dispersive planar waveguide devices: echelle gratings and arrayed waveguide gratings, in Optical Waveguides: from Theory to Applied Technologies». En: M. L. Calvo y V. Lakshminarayanan eds, 2007. Cap. 5.

[24] Z. Y. Sheng et al. «Design and simulation for etched diffraction grating for DWDM in optical communication». En: *Guangxi Xuebao / Acta Photonica Sinica* 30.5 (2001), pág. 567.

[25] J. Song y N. Zhu. «Analysis method of the effect of fabrication errors on a planar waveguide demultiplexer». En: *Optics and Quantum Electronics* 38.15 (2006), págs. 1203-1216. DOI: 10.1007/s11082-006-9019-7.

[26] B. B. Bhowmik, S. Gupta y R. Gangopadhyay. «Simultaneous demodulation and dispersion compensation of WDM DPSK channels using optical ring resonator». En: *Optics Communications* 285.16 (2012), págs. 3483-3486. DOI: 10.1016/j.optcom.2012.04.005.

[27] M. R. Almasian y K. Abedi. «A proposal for optical WDM using embedded photonic crystal ring resonator with distributed coupling». En: *Physica E: Low-Dimensional Systems & Nanostructures* 79 (2016), págs. 173-179. DOI: 10.1016/j.physe.2016.01.001.

[28] H. Y. Wong et al. «Integrated Asymmetric Mach-Zehnder Interferometer WDM (De)Multiplexer Using Quantum Well Intermixing». En: *Proceedings of the 2005 International Conference on Indium Phosphide and Related Materials*. Glasgow, Scotland, United Kingdom: Institute of Electrical y Electronics Engineers Inc., mayo de 2005.

[29] A. V. Krishnamoorthy et al. «Dense WDM Silicon Photonic Interconnects for Compact High-End Computing Systems». En: *Proceedings of the 2011 IEEE Winter Topicals*. IEEE Computer Society, 2011.

[30] Y. Yang et al. «Thermo-optically tunable silicon AWG with above 600 GHz channel tunability». En: *IEEE Photonics Technology Letters* 27.22 (2015), págs. 2351-2354. DOI: 10.1109/LPT.2015.2464073.

[31] Shiping Liu et al. «Low-crosstalk silicon-photonics arrayed waveguide gratings integrated with micro-ring filter». En: *Frontiers in Physics* 10 (2022). ISSN: 2296-424X. DOI: 10.3389/fphy.2022.1018589. URL: https://www.frontiersin.org/journals/physics/articles/10.3389/fphy.2022.1018589.

[32] V. Vasiliev et al. «Integrated silicon-on-insulator spectrometer with single pixel readout for mid-infrared spectroscopy». En: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 24.6 (nov. de 2018).

[33] R. Wang et al. «III-V-on-silicon photonic integrated circuits for spectroscopic sensing in the 2–4 μm wavelength range». En: *Sensors* 17.8 (2017).

[34] Z. Hu et al. «Integrated microspectrometer for fluorescence based analysis in a microfluidic format». En: *Lab on a Chip* 12 (2012), págs. 2850-2857.

[35] L. Cabernard et al. «Comparison of Raman and Fourier transform infrared spectroscopy for the quantification of microplastics in the aquatic environment». En: *Environmental Science & Technology* 52.22 (2018), págs. 13279-13288.

[36] Y. C. Chang et al. «Cocaine detection by a mid-infrared waveguide integrated with a microfluidic chip». En: *Lab on a Chip* 12.17 (2012), págs. 3020-3023.

[37] N. P. Vidal et al. «Fourier transform infrared spectroscopy as a tool to study farmed and wild sea bass lipid composition». En: *Journal of the Science of Food and Agriculture* 94 (2014), págs. 1340-1348.

[38] N. A. Owens et al. «Handheld Raman spectrometer instrumentation for quantitative tuberculosis biomarker detection: A performance assessment for point-of-need infectious disease diagnostics». En: *Applied Spectroscopy* 72 (2020), págs. 1104-1115.

[39] E. A. Rank et al. «Toward optical coherence tomography on a chip: In vivo three-dimensional human retinal imaging using photonic integrated circuit-based arrayed waveguide gratings». En: *Light: Science & Applications* 10 (2021).

[40] P. Gatkine, S. Veilleux y M. Dagenais. «Astrophotonic spectrographs». En: *Applied Sciences* 9.2 (2019).

[41] Andreas Stoll, Kalaga V. Madhav y Martin M. Roth. «Design, simulation and characterization of integrated photonic spectrographs for astronomy: generation-I AWG devices based on canonical layouts». En: *Opt. Express* 29 (2021), págs. 24947-24971. DOI: 10.1364/OE.421064.

[42] Wavelength Opto-Electronic. *What is a Spectrometer?* Accessed: 2024-07-22. 2024. URL: https://wavelength-oe.com/blog/what-is-a-spectromet.

[43] S. H. Kong et al. «Integrated silicon microspectrometer». En: *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine* 4 (2001), págs. 34-38.

[44] T. Bradshaw, S. B. Mendes y S. S. Saavedra. «Planar integrated optical waveguide spectroscopy». En: *Analytical Chemistry* 77 (2005), págs. 29-36.

[45] S. H. Kong, D. D. L. Wijngaards y R. F. Wolffenbuttel. «Infrared micro-spectrometer based on diffraction grating». En: *Sensors and Actuators A: Physical* 92 (2001), págs. 88-95.

[46] K. K. Choi et al. «Quantum grid infrared spectrometer». En: *Applied Physics Letters* 84 (2004), págs. 4439-4441.

[47] George F. Fine et al. «Metal Oxide Semi-Conductor Gas Sensors in Environmental Monitoring». En: *Sensors* 10.6 (2010), págs. 5469-550.

[48] J. Zou et al. «A Polarization-Insensitive High-Resolution Micro-Spectrometer Using $(N+3)\times(N+3)$ Arrayed Waveguide Grating on SOI Platform». En: *Journal of Lightwave Technology* 41.1 (ene. de 2023), págs. 226-232.

[49] N. Juhari et al. «Investigation of AWG Demultiplexer Based SOI for CWDM Application». En: *EPJ Web of Conferences*. Vol. 162. EDP Sciences, 2017, pág. 01035.

[50] E. J. Stanton, N. Volet y J. E. Bowers. «Silicon Arrayed Waveguide Gratings at 2.0-μm Wavelength Characterized with an On-Chip Resonator». En: *Optics Letters* 43.5 (2018), págs. 1135-1138.

[51] Shaonan Zheng et al. «A Single-Chip Integrated Spectrometer via Tunable Microring Resonator Array». En: *IEEE Photonics Journal* 11.5 (2019), págs. 1-9. DOI: 10.1109/JPHOT.2019.2939580.

[52] Zunyue Zhang et al. «Integrated scanning spectrometer with a tunable micro-ring resonator and an arrayed waveguide grating». En: *Optics Letters* 46.10 (2021), págs. 2345-2348. DOI: 10.1364/OL.423456.

[53] P. Heben et al. «Recent Advances in Silicon Microphotonic Devices». En: *Revista Cubana de Física* 25.2A (2008). URL: http://revistas.ien.cu/index.php/revistacubana.

[54] John Heebner, R. Grover y Taofiq Ibrahim. «Optical Microresonator Theory». En: *Optical Microresonators: Theory, Fabrication, and Applications*. Ed. por Kerry J. Vahala. Vol. 138. Springer Series in Optical Sciences. Springer, 2008, págs. 71-103. DOI: 10.1007/978-0-387-73068-4_3. URL: https://doi.org/10.1007/978-0-387-73068-4_3.

Parte IV

Conclusiones.

Capítulo 9

Conclusiones generales.

Índice

9.1. Conclusiones capítulo 6. 297
9.2. Conclusiones capítulo 7. 299
9.3. Conclusiones capítulo 8. 300
9.4. Perspectivas a futuro. 302

En esta tesis doctoral, hemos desarrollado dispositivos fotónicos integrados utilizando fotónica de silicio. Para lograrlo, fue necesario comprender los fenómenos físicos que los gobiernan, utilizando métodos numéricos para el diseño, modelado, optimización y enrutamiento de los circuitos ópticos. Finalmente, se profundizó en los procesos de microfabricación, caracterización y empaquetado de un chip fotónico. Se abordaron dos plataformas tecnológicas de fabricación: el nitruro de silicio (Si_3N_4) y el silicio sobre aislante (SOI). Cada nodo tecnológico fue explorado y se han expuesto los aspectos clave que hacen de la fotónica de silicio, un campo de investigación de vanguardia en varias ramas con aplicaciones científicas, tecnológicas e industriales. Lo que hace que la fotónica de silicio sea una tecnología única, es su compatibilidad con los procesos de fabricación y las herramientas utilizadas en la industria CMOS, lo que le permite alcanzar un grado de precisión y repetetividad que no lo ofrece ningún otro tipo de tecnología hoy en día. La segunda característica única de la fotónica de silicio es su alto contraste de índice de refracción, lo que le permite alcanzar dimensiones de guías de onda sub-micrométricas, curvaturas cerradas y a su vez, integrar un gran número de funciones ópticas en la superficie de un chip. Esta combinación ha convertido a la fotónica de silicio en la única plataforma tecnológica viable para desarrollar circuitos fotónicos integrados de alta complejidad y gran escala. Sin embargo, el alto contraste de índice de refracción exige requisitos estrictos en las dimensiones de los circuitos fotónicos, ya que pequeñas variaciones en el ancho o espesor del nú-

cleo de la guía de onda pueden afectar el rendimiento. La variabilidad del proceso de fabricación impacta significativamente en los circuitos grandes y complejos. Al final, es el rendimiento global de un circuito lo que determina si es comercialmente viable o no.

Hemos utilizados dos enfoques en el desarrollo de circuitos fotónicos integrados, el primero se lleva a cabo en una sala limpia, en donde se caracterizan los procesos y las recetas de los procesos litográficos establecidos por la industria de la microelectrónica, adaptándolos al régimen de la fotónica de silicio. Se utilizó el equipamiento instalado, y las primeras etapas se basaron en la familiarización con la tecnología utilizada en una sala limpia y el principio de funcionamiento de las técnicas de micro-fabricación CMOS, luego durante sucesivos ensayos y prácticas experimentales, se llevo a cabo la caracterizacón de los procesos litográficos y fabricación de chips fotónicos integrados en silicio.

El segundo enfoque es a través de un proyecto multi-oblea (MPW) a través de una *foundrie* en el exterior, lo que reduce significativamente los costos de prototipado. Además, estas *foundries* ofrecen componentes estándar previamente probados e implementados, reduciendo así los tiempos de diseño y se minimiza la incertidumbre. Esto amplia las posibilidades de aplicación de la fotónica integrada, permitiendo la creación de circuitos más complejos y eficientes.

Parte de este trabajo es haber identificado los procedimientos esenciales para poder desarrollar circuitos fotónicos integrados, así como el haber explorado una diversidad de dispositivos clave de la fotónica de silicio. Además, en aportar un manuscrito lo más detallado posible, con el objetivo de proporcionar a las futuras generaciones una herramienta útil como un punto de partida, que complemente al estado del arte disponible en diversas publicaciones.

A continuación, se exponen las conclusiones de los resultados más relevantes encontrados a lo largo de esta tesis doctoral, siguiendo las metodología desarrollada que se basa en: idea, diseño, fabricación, caracterización y empaquetado de chips fotónicos integrados.

9.1. Conclusiones capítulo 6.

Se presentan las técnicas de fabricación CMOS, la infraestructura y la tecnología empleada en esta tesis para fabricar chips fotónicos integrados con la plataforma del nitruro de silicio (Si_3N_4). El desarrollo se llevó a cabo en la sala limpia del Departamento de Micro y Nanotecnología (DMNT-CNEA), en donde se caracterizaron los procesos litográficos UV establecidos por la microelectrónica,

adaptándolos a las condiciones necesarias para la fabricación dispositivos fotónicos integrados. En primer lugar se diseño y fabricó una fotomáscara que contiene los patrones de los dispositivos fotónicos de interés, luego se caracterizó el deposito de fotoresinas, tiempos de exposición y revelado. Finalmente, con la técnica RIE se ajustó el tiempo de ataque para definir las paredes de las guías de onda. En cada etapa se usaron distintas herramientas y técnicas para verificar la calidad del proceso de las guías, como es el uso microscopios ópticos y FIB-SEM, elipsometría, entre otros. El resumen de la receta ajustada y tiempos caracterizados para fabricar chips fotónicos integrados en nitruro de silicio, se puede ver en la tabla 6.1 y en la Figura 6.22.

Asimismo, se abordaron dos técnicas para el corte obleas, como es el uso de una cortadora automática y la técnica manual de clivado con punta de diamante. La técnica automática resultó ser muy rápida pero con la desventaja que los bordes no son lisos, lo que convella una etapa laboriosa de pulido con pastas diamantadas para su posterior inyección de luz láser. La técnica manual de clivado resultó ser más lenta y, en ocasiones, el corte puede desviarse del eje cristalino preferencial del silicio. Sin embargo, encontramos que el borde termina con mejor calidad óptica, lo que reduce considerablemente los tiempos de pulido en los bordes.

También se estableció una técnica para eliminar el efecto borde después de depositar fotoresina en muestras cuadradas. Para ello, se utilizó una cortadora de obleas para hacer marcas cerca de los bordes del chip. Luego, al clivar estas marcas en los bordes con exceso de fotoresina, pudimos separar las secciones de las muestras que tenían efecto borde. Esto mejoró notablemente el proceso de transferencia UV entre la fotomáscara y las muestras cuadradas

Finalmente, se desarrollo un set-up experimental con el método de acople óptico por el borde (*edge couplers*) en chips fotónicos. Dado la complejidad que conlleva acoplar luz con esta técnica, se abordaron distintos esquemas experimentales con el instrumental con el que contamos. Encontramos que la forma más sencilla es usar un inyectar un láser visible a un *lensed fiber* a la entrada del chip, y a su salida adaptar un objetivo microscopio seguido de una cámara sensible al visible y al infrarrojo. Con la luz visible, alineamos el trayecto óptico del chip entre las entradas y salidas. Para determinar la altura entre el *lensed fiber* y las guías de onda de entrada, nos guiamos por un patrón de interferencia generado en la superficie del chip. Una vez que todo se encuentra alineado, se introduce luz infrarroja en la banda C, esto debido a que los dispositivos fueron diseñados para guiar luz en esa banda de frecuencias.

9.2. Conclusiones capítulo 7.

Se describe el desarrollo completo de divisores de potencia ópticos integrados 1x2, 1x4 y 1x8 utilizando la tecnología del silicio, implementado en las plataformas del silicio sobre aislante (SOI) y nitruro de silicio (Si_3N_4), desde el diseño, fabricación, test y *packaging* de los mismos. En particular se implementa un divisor de potencia que divide la señal de entrada a través de un interferómetro multimodal (MMI), y las ramas de salida son diseñadas a partir de la teoría del acoplamiento coherente (SCC). Para el diseño se utilizó un enfoque sistemático, repetible y adaptable en ambas tecnologías empleando potentes herramientas de cálculo numérico para su optimización. Tanto en nitruro de silicio y silicio sobre aislante, el dispositivo demostró presentar bajas pérdidas de inserción, ser ultracompacto y un parámetro libre que puede ser útil para construir divisores escalados a más cantidad de salidas. Con la plataforma del nitruro de silicio se demostró una transmisión entre -3,15 dB y -3,38 dB para una amplia gama de longitudes libres L_2. El diseño en Si_3N_4 resultó ser casi 6,5 veces más pequeño que otro dispositivo divisor de potencia estándar y con un comportamiento similar. Con la plataforma del silicio sobre aislante, se consiguió una potencia de transmisión entre -3,05dB y -3,15dB, que va a depender del parámetro libre de diseño L_2. Finalmente, el diseño en SOI demostró ser casi nueve veces más pequeño que otro dispositivo de uso común y con un comportamiento similar.

En cuanto a la fabricación, los dispositivos propuestos basados en nitruro de silicio, fueron fabricados utilizando los procesos litográficos caracterizados en la sala limpia del DMNT, y pueden ser acoplados utilizando el set-up experimental desarrollado para acoplar luz por los bordes. Respecto de los dispositivos basados en silicio sobre aislante, fueron fabricados mediante un proyecto multi-oblea (MPW), en donde la técnica de acople hacia el chip se realiza por el método vertical (*grating couplers*). Esto abrió paso a la construcción de un sistema experimental automático de micro-posicionamiento para caracterizar este tipo de dispositivos integrados, y que además resulto ser útil para las siguientes etapas de integración y proceso de empaquetado del chip fotónico.

Respecto de la integración y empaquetado, en este trabajo se ofrece los pasos secuenciales necesarios para seguir un proceso sencillo, rápido y económico de integración y empaquetado de integrar un divisor de potencia 1x8 fabricado con la plataforma del silicio sobre aislante (SOI). Además, describimos el proceso completo para producir este sistema fotónico, desde el diseño, fabricación, integración y prueba del divisor de potencia propuesto bajo esta plataforma. Por otro lado, prestamos mucha atención al procedimiento del paso de integración,

donde se consideraron y realizaron bien la pre-alineación y pequeños ajustes para mejorar la potencia de salida. Asimismo, para desarrollar e implementar el *packaging* de este sistema, utilizamos la impresión 3D para realizar un prototipo óptico integrado de rápida funcionalidad y bajo coste. Obtuvimos un sistema fotónico adecuado que reporta una pérdida de inserción de alrededor de 15 dB, adecuado para aplicaciones de telecomunicaciones en redes FTTH. Este es un buen valor teniendo en cuenta las tecnologías de empaquetado y el rápido proceso logrado para llevar a cabo el dispositivo integrado propuesto. Esto abre la posibilidad de adquirir varios procesos de implementación que pueden realizarse fácilmente en laboratorios de baja complejidad.

Finalmente, se caracterizaron los divisores de potencia propuestos 1x2, 1x4 y 1x8 con la plataforma SOI. Los divisores 1x2, 1x4 y 1x8 presentaron pérdidas de -3.5 dB, -10 dB y -15 dB respectivamente, y fueron comparados con otros dispositivos divisores convencionales 1x2 y 1x4 y que presentaron pérdidas de -4 dB y -10 dB respectivamente.

9.3. Conclusiones capítulo 8.

Se propone una metodología útil para diseñar demultiplexores de longitud de onda (AWG) mediante el estudio de sus parámetros clave, lo que nos permite optimizar características específicas en su respuesta espectral así como también de su tamaño. Se presenta un simple pero comprensivo y completo modelo de campo de un AWG de 1x8 canales, pero al mismo tiempo el método empleado para calcular parámetros relevantes como: *free spectral range* (FSR), *crosstalk*, pérdidas por inserción, desplazamiento de longitud de onda central, no uniformidad, entre otros. Entonces, elaboramos un modelo computacional que presenta un procedimiento útil. Esto abrió paso a explorar el comportamiento de una de las carácterísticas más relevantes en un AWG como es el crosstalk, y mediante sucesivas simulaciones numéricas estudiamos su sensibilidad y comportamiento al variar los parámetros geométricos del AWG. Podemos concluir que el incremento de alguno de estos parámetros es proporcional a estrechar el lóbulo lateral a la salida del AWG, porque en la mayoría de casos, se logra mejorar la interferencia constructiva en la región de propagación libre de salida 2, y en consecuencia la resolución espectral, sin embargo, se analizó que incrementar demasiado alguno de estos parámetros no es posible y tiene limitaciones, en primer lugar porque puede crecer considerablemente el área final del dispositivo, y segundo, porque empiezan a generarse pérdidas excesivas en alguna de las etapas del AWG, lo que

puede degradar totalmente la respuesta del sistema demultiplexor.

Bajo la metodología implementada, se diseñaron AWGs 1x8 y 1x16 con las plataformas tecnológicas del silicio sobre aislante y nitruro de silicio. Se pudo mostrar que el diseño propuesto en SOI presenta pérdidas de inserción en el canal central de -5 dB, mientras que en Si_3N_4 se obtuvieron menores pérdidas de -1.4 dB. Como contraparte, el área final de los AWG en SOI, resultaron ser menores que los reportados en Si_3N_4, por ejemplo, teniendo en cuenta un AWG 1x8, los dispositivos en SOI en promedio ocuparon un área de 228x237 μm^2, mientras que un AWG basado nitruro de silicio ocuparon un área de 465x362 μm^2.

Respecto de los resultados experimentales, se fabricaron AWGs 1x8 mediante un proyecto multi-oblea (MPW) con la plataforma tecnológica del SOI. Para caracterizar los AWGs, se utilizó el sistema experimental automático de microposicionamiento de acople vertical, al cual se le adaptó un led superluminiscente (SLED) y un analizar de espectros ópticos (OSA), lo que resultó ser clave para obtener medidas rápidas y fiables. Se caracterizaron dos AWGs y ambos presentaron bajas pérdidas. Los resultados del AWG_1 resultó con unas pérdidas de inserción en el canal central de -5 dB y un *crosstalk* entre canales vecinos de -7 dB. Al AWG_2 se le fue agregado *linear tapers* en los acoplares de entrada, esto permitió reducir las pérdidas hasta -2.5 dB. También se le agregaron *linear tapers* en los acopladores de salida, lo que aumentó la interferencia el *crosstalk* entre canales vecinos, esto debido al ensanchamiento gradual en las guías de onda de los N arrays, provocando un comportamiento multimodal en las aperturas de salida. Para el AWG_2, hubiese sido conveniente diseñarlo con un mayor espaciado de canal $\Delta\lambda$ y de esa manera no aumentar la interferencia (*crosstalk*) entre canales vecinos. Otra opción es solo agregar *linear tapers* en el acoplador de entrada para mejorar la transmisión, y no en el acoplador de salida para evitar aumentar la interferencia de señales (*crosstalk*) entre canales vecinos. De todas formas, en base al AWG_1, podemos concluir que se diseño, fabricó y caracterizó con éxito un AWG de bajas pérdidas y un *crosstalk* aceptable, bajo la plataforma tecnológica del SOI.

Finalmente, se proponen sensores de gases espectroscópicos integrado en SOI, que utilizan a los AWGs como elemento clave. Estas guías de ondas dispersivas, en combinación con doble-anillos resonadores (CROW) y desfasadores térmicos, se pueden diseñar para ajustarse a las diferentes sensibilidades de absorción de los gases objetivo, lo que posibilita la detección e identificación simultánea de varios elementos. El espectrómetro propuesto está sintonizado para la detección de gases de efecto invernadero en la banda del infrarrojo cercano (NIR). Podemos concluir que el espectrómetro propuesto, ofrece una mejor resolución espectral en compa-

ración con otras topologías, como la de un AWG convencional o una combinación de un anillo resonador (MRR) + AWG. Esta mejora se ha conseguido mediante la implementación de una serie de filtros resonadores CROW que reducen considerablemente el lóbulo lateral a la salida del AWG. Además, la implementación de desfasadores térmicos, permitió ajustar la respuesta espectral. En un primer diseño se demostró un sensor espectroscópico de 80 canales con alta resolución espectral, que coinciden con el espectro de absorción de los gases de interés, especialmente gases de efecto invernadero como el vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2) y el óxido nitroso (N_2O). En un segundo diseño, se mejoró la capacidad de detección elevando la cantidad de componentes del sensor y se demostró un espectrómetro integrado de 144 canales. De los resultados obtenidos para ambos propuestas, se obtuvo un ancho total a la mitad del máximo (FWHM) de 0.35 nm, pérdidas de inserción de -8.77 [dB] y un *crosstalk* con el canal vecino en el canal central de -20.34[dB]. Esto es significativo porque la adición de más dispositivos no degradó el rendimiento del sistema. Por otro lado, al igual que la espectroscopia en el infrarrojo cercano (NIRS) contribuye a la química verde al no utilizar reactivos peligrosos, un espectrómetro fotónico integrado en SOI también puede se ofrece como herramienta ecológica y segura para la detección y análisis de materiales. Esto está en concordancia con los objetivos de minimizar el impacto ambiental y promover la sostenibilidad en las prácticas analíticas tanto científicas como industriales.

9.4. Perspectivas a futuro.

En base al trabajo realizado en esta tesis, se pueden continuar y/o mejorar e implementar, una serie de desarrollos con una perspectiva futura cercana.

- Una de las técnicas introducidas en el **capítulo 6** en la cual se va a trabajar en el corto plazo, es la caracterización de los procesos litográficos atacando obleas enteras, utilizando un equipo comercial PlasmaPro 100 Cobra RIE de Oxford Instruments en la sala limpia del DMNT. Este equipo posee una campana más grande y mejor tecnología para controlar la profundidad de ataque, respecto del equipo con el que veníamos trabajando, lo que permitirá reducir la rugosidad de las paredes y mejorar la calidad de las guías de onda en nitruro de silicio.

- De los desarrollos expuestos en el **capítulo 7**, una de las tareas a continuar es la caracterización de los divisores de potencia 1x2, 1x4 y 1x8 propuestos,

que fueron fabricados en nitruro de silicio. Esto se realizará utilizando el set-up experimental desarrollado en el *capitulo 6* para acoplar ópticamente al chip por los bordes.

- Asimismo, en el **capítulo 8**, de los sensores de gases desarrollados, se puede rediseñar el modelo agregando en los AWGs, interferómetros multimodo (MMI) cortos sobre el final de las guías de onda del transmisor (salida de los N_{array}). El MMI puede convertir el modo de guía de onda simple en una imagen doble, esto da como resultado una respuesta plana en los canales de salida del AWG. Esto es punto interesante, porque al tener un lóbulo con estas características, la No Uniformidad de las longitudes de onda entre los canales centrales y externos, va a ser reducida considerablemente, lo que mejoraría el rendimiento espectral de todo el sistema.

  La topología propuesta en el sensor espectroscópico, puede ser de mucho interés y escalada para la detección de gases en la banda de infrarrojo medio (MIR), donde los picos de absorción son más estrechos. Por lo tanto, la versatilidad de la configuración de la serie CROW+AWG, abre nuevas oportunidades para la detección simultánea de múltiples gases de distintas bandas en una sola plataforma integrada. Asimismo, la implementación de sistemas re alimentados con IA, para adaptar el sensor al espectro del gas inspeccionado, puede mejorar la calidad al aumentar las características y versatilidad del sistema propuesto.

  Otra perspectiva a futuro es desarrollar sensores espectroscópicos en el NIR utilizando las plataformas tecnológicas de nitruro de silicio y oxinitruro de silicio (SiON), ya que contamos con lotes de obleas de ambas plataformas. Tanto el nitruro como el oxinitruro (SiON) son transparentes en el visible y en el NIR. Desde el punto de vista de los procesos de fabricación en la sala limpia (que aún se siguen mejorando), el uso del SiON es un enfoque prometedor. La resolución litográfica en el ancho de las guías en SiON no es tan exigente para guiar luz en la condición monomodo. Esto es interesante ya que a medida que el ancho o espesor del núcleo de la guía aumenta, el impacto de las pérdidas ópticas por rugosidad en las paredes se reduce. Lo que abre la posibilidad de fabricar, caracterizar y empaquetar sensores espectroscópicos fotónicos integrados con un desarrollo 100 % local.