

Universidad de Málaga  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación  
(Programa de doctorado en Ingeniería de Telecomunicación)



TESIS DOCTORAL/DOCTORAL THESIS

# Highly efficient distributed Bragg deflectors for silicon photonic waveguide devices

Deflectores de Bragg distribuidos de alta eficiencia para  
dispositivos basados en guías de onda fotónicas de silicio

Autor/Author:

Abdelfettah Hadij El Houati

Directores/Supervisors:

Íñigo Molina Fernández

&

Pavel Cheben


**2022**





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

AUTOR: Abdelfettah Hadij El Houati

 <https://orcid.org/0000-0002-8363-7423>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): [riuma.uma.es](http://riuma.uma.es)





## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD DE LA TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO DE DOCTOR

D./Dña **ABDEFETTAH HADIJ EL HOUATI**

Estudiante del programa de doctorado **EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN** de la Universidad de Málaga, autor/a de la tesis, presentada para la obtención del título de doctor por la Universidad de Málaga, titulada: **“HIGHLY EFFICIENT DISTRIBUTED BRAGG DEFLECTORS FOR SILICON PHOTONIC WAVEGUIDE DEVICES”**




Realizada bajo la tutorización de **ÍÑIGO MOLINA FERNÁNDEZ** y dirección de **ÍÑIGO MOLINA FERNÁNDEZ Y PAVEL CHEBEN**

DECLARO QUE:

La tesis presentada es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, conforme al ordenamiento jurídico vigente (Real Decreto Legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), modificado por la Ley 2/2019, de 1 de marzo.

Igualmente asumo, ante a la Universidad de Málaga y ante cualquier otra instancia, la responsabilidad que pudiera derivarse en caso de plagio de contenidos en la tesis presentada, conforme al ordenamiento jurídico vigente.

En Málaga, a **13 de junio de 2022**

 Fdo.: <b>ABDEFETTAH HADIJ EL HOUATI</b> Doctorando/a	 Fdo.: <b>ÍÑIGO MOLINA FERNÁNDEZ</b> Tutor/a
	
Fdo.: <b>ÍÑIGO MOLINA FERNÁNDEZ</b> <b>Y</b> <b>PAVEL CHEBEN</b> Director/es de tesis	





UNIVERSIDAD  
DE MALAGA



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



Escuela de Doctorado

Yo, **Iñigo Molina Fernández** tutor y director de la tesis titulada “Highly efficient distributed Bragg deflectors for silicon photonic waveguide devices”, realizada por el estudiante del programa de doctorado en Ingeniería de Telecomunicación **Abdelfettah Hadij El Houati** autorizo la presentación de la tesis por compendio de publicaciones.

De igual forma, confirmo que las publicaciones que avalan esta tesis, las cuales se pueden consultar en el Apéndice A de esta memoria, no han sido utilizadas en tesis anteriores.

En Málaga, a 13 de junio de 2022.

Fdo. Iñigo Molina Fernández  
Director y tutor de tesis

UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



EFQM AENOR



Edificio Pabellón de Gobierno. Campus El Ejido. 29071

Tel.: 952 13 10 28 / 952 13 14 61 / 952 13 71 10

E-mail: doctorado@uma.es



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

# Highly efficient distributed Bragg deflectors for silicon photonic waveguide devices

Abdelfettah Hadij El Houati



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



## Agradecimientos

Esta tesis, como casi todo trabajo de envergadura, no es sólo el resultado del esfuerzo solitario del autor, sino también de las innumerables aportaciones directas e indirectas, técnicas y humanas, de un gran número de personas. Por ello, me gustaría dar las gracias a las personas que más han influido en el éxito de esta tesis.

Por supuesto, mis directores, Íñigo y Pavel, forman parte de este grupo de personas que han contribuido especialmente a esta tesis. Me gustaría agradecerles su gran dedicación y paciencia durante los últimos años. Por otro lado, el resto de profesores del grupo de fotónica de la Universidad de Málaga también merecen una mención especial, ya que siempre han estado disponibles para responder a mis dudas e inquietudes como si fueran mis directores. Todos ellos, tanto mis directores como el resto de profesores del grupo, han trascendido el plano profesional para convertirse en amigos que espero conservar el resto de mi vida.

También me gustaría dedicar unas palabras a los compañeros del laboratorio 1.3.2 con los que compartido penurias y cuñaderías, que en más de una ocasión resultaron ser buenas ideas. Sin todos los momentos, tanto de ocio como de trabajo que hemos compartido, esta tesis no sería la misma. Este agradecimiento, lo extiendo al resto de juniors del departamento que siempre han estado para amenizar mi paso por la escuela y ayudar en todo lo posible.

También me gustaría dar las gracias a mis amigos, que siempre han estado ahí en los buenos y en los malos momentos. Muchas gracias por todos los momentos de diversión, así como por las conversaciones profundas sobre las cosas realmente importantes de la vida.

Por último, estos agradecimientos no pueden estar completos sin una especial mención a mi familia que siempre me ha apoyado desde mi nacimiento. Parafraseando lo que un amigo mío dijo: el lenguaje es incapaz de recoger la gratitud que siento hacia mi familia



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

This Thesis has been possible thanks to the financial support of the Spanish State. Specifically, this thesis has received funding from the following programs, projects and institutions:

- Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades
  - Grant for university teacher training Num. FPU16/03401
- Ministerio de Economía y Competitividad
  - Research project Num. PID2019-106747RB-I00
- Junta de Andalucía
  - Research project Num. UMA18-FEDERJA-219
- Consejería de Economía, Conocimiento, Empresas y Universidad, Junta de Andalucía
  - Research project Num. P18-RT-1453
  - Research project Num. P18-RT-793
- Universidad de Málaga



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

# Contents

## Acronyms

<b>Organization of this Thesis</b>	<b>1</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>3</b>
1.1 Silicon photonics . . . . .	3
1.1.1 Overview . . . . .	3
1.1.2 Silicon photonics platforms . . . . .	4
1.1.3 Silicon photonics challenges . . . . .	5
1.1.4 The fab-less paradigm and Thesis contribution to advancing silicon photonics . . . . .	6
1.2 Distributed Bragg Deflectors . . . . .	10
1.3 Thesis contributions . . . . .	11
1.3.1 Direct contributions . . . . .	11
1.3.2 Indirect contributions . . . . .	12
1.4 References . . . . .	13
<b>2 Distributed Bragg deflectors</b>	<b>27</b>
2.1 Geometry and working principle . . . . .	27
2.2 System analysis and design tools . . . . .	30
2.2.1 System parameters and design procedure for uniform deflectors . . . . .	30
2.2.2 FDTD-based Floquet-Bloch analysis . . . . .	31
2.2.3 Apodization . . . . .	33
2.3 Complete design of an apodized DBD . . . . .	36
2.3.1 Free-space link emulation: back-to-back DBD structure . . . . .	39
2.3.2 Experimental validation . . . . .	40
2.4 Lossless Bragg deflector . . . . .	42
2.4.1 The single-beam condition . . . . .	42
2.4.2 Verification of the single-beam condition . . . . .	43
2.4.3 Lossless DBD design . . . . .	45
2.4.4 Results and discussion . . . . .	46
2.5 References . . . . .	48
<b>3 Curved waveguide grating demultiplexers</b>	<b>51</b>
3.1 CWG operation principle . . . . .	51
3.2 Off-axis CWG design . . . . .	53
3.3 Simulation . . . . .	54
3.4 Low-loss CWG demultiplexer demonstration . . . . .	54

3.5	Thermal tuning of curved waveguide demultiplexers . . . . .	58
3.5.1	Optical model . . . . .	58
3.5.2	Thermal model . . . . .	59
3.5.3	Heat transfer analysis . . . . .	59
3.5.4	Experimental results . . . . .	60
3.6	Flat-top design . . . . .	62
3.7	Conclusions . . . . .	63
3.8	References . . . . .	64
<b>4</b>	<b>Distributed Bragg deflector as antenna feeder</b>	<b>67</b>
4.1	Working principle and theoretical analysis . . . . .	67
4.2	Experimental verification . . . . .	70
4.3	References . . . . .	72
<b>5</b>	<b>Conclusions</b>	<b>73</b>
5.1	References . . . . .	74
<b>A</b>	<b>Published works</b>	<b>75</b>
A.1	Distributed Bragg deflector coupler for on-chip shaping of optical beams	75
A.2	High-efficiency conversion from waveguide mode to an on-chip beam using a metamaterial engineered Bragg deflector . . . . .	77
A.3	Low-loss off-axis curved waveguide grating demultiplexer . . . . .	79
A.4	Low-loss off-axis curved waveguide grating demultiplexer: supplement . . . . .	81
<b>B</b>	<b>Resumen en español</b>	<b>83</b>
B.1	Introducción . . . . .	84
B.1.1	Fotónica de silicio . . . . .	84
B.1.2	Introducción a los deflectores de Bragg distribuidos . . . . .	92
B.1.3	Contribuciones a la tesis . . . . .	93
B.2	Deflectores de Bragg distribuidos . . . . .	95
B.2.1	Geometría y principio de funcionamiento . . . . .	95
B.2.2	Herramientas de análisis y diseño de sistemas . . . . .	97
B.2.3	Diseño completo de un DBD apodizado . . . . .	102
B.2.4	Deflector de Bragg sin pérdidas . . . . .	104
B.2.5	Conclusiones . . . . .	109
B.3	Demultiplexores de rejilla de guíaonda curva . . . . .	110
B.3.1	Principio de funcionamiento del CWG . . . . .	110
B.3.2	Diseño de CWG fuera del eje . . . . .	111
B.3.3	Procedimiento de simulación . . . . .	112
B.3.4	Demultiplexor CWG de bajas pérdidas . . . . .	113
B.3.5	Sintonización térmica de demultiplexores de guía de onda curvada	116
B.3.6	Diseño con banda de paso plana . . . . .	118
B.3.7	Conclusiones . . . . .	120
B.4	Deflector de Bragg distribuido como alimentador de antena . . . . .	121
B.4.1	Principio de funcionamiento y análisis teórico . . . . .	121
B.4.2	Verificación experimental . . . . .	124
B.5	Conclusiones . . . . .	126
B.6	Bibliografía . . . . .	127





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



<b>AWG</b>	Arrayed Waveguide Grating.
<b>BOX</b>	Buried Oxide.
<b>CAD</b>	Computer-aided Design.
<b>CMOS</b>	Complementary Metal-oxide-semiconductor.
<b>CWG</b>	Curved Waveguide Grating.
<b>DBD</b>	Distributed Bragg Deflector.
<b>DWDM</b>	Dense Wavelength Division Multiplexing.
<b>e-beam</b>	Electron-beam.
<b>EG</b>	Echelle Grating.
<b>FDM</b>	Filter Diagonalization Method.
<b>FDTD</b>	Finite-difference Time-domain.
<b>FPR</b>	Free Propagation Region.
<b>GOS</b>	Germanium-on-silicon.
<b>GRIN</b>	Graded Index.
<b>LIDAR</b>	Light Detection and Ranging.
<b>MFD</b>	Mode Field Diameter.
<b>MFR</b>	Mode Field Radius.
<b>MFS</b>	Minimum Feature Size.
<b>MMI</b>	Multi-mode Interferometer.
<b>MZI</b>	Mach-Zehnder Interferometer.
<b>OCT</b>	Optical Coherence Tomography.
<b>OPA</b>	Optical Phased Array.
<b>PBC</b>	Periodic Boundary Condition.
<b>PDK</b>	Process Design Kit.
<b>PIC</b>	Photonic Integrated Circuit.
<b>RIE</b>	Reactive-ion Etching.
<b>SEM</b>	Scanning Electron Microscope.
<b>SiN</b>	Silicon Nitride.
<b>SiPh</b>	Silicon Photonics.
<b>SOI</b>	Silicon-on-insulator.
<b>SWG</b>	Sub-wavelength Grating.

<b>TE</b>	Transversal Electric.
<b>TIR</b>	Total Internal Reflection.
<b>UV</b>	Ultraviolet.
<b>VOA</b>	Variable Optical Attenuator.
<b>WDM</b>	Wavelength Division Multiplexing.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

# Organization of this Thesis

This Thesis is organized as follows:

**Chapter 1:** Introduction. Here, [silicon photonics \(SiPh\)](#) is briefly presented and its main advantages and limitations are described. We then review the state of the art of some fundamental building blocks for which the developed [distributed Bragg deflector \(DBD\)](#) could have a beneficial impact and the [distributed Bragg deflector](#) is described. Finally, the most significant contributions of this Thesis are outlined.

**Chapter 2:** The [distributed Bragg deflector](#) geometry and operation are introduced, including its working principle. An efficient analysis method based on Floquet-Bloch modal analysis is presented and the origin of the losses in previously reported [silicon-on-insulator \(SOI\)](#) deflectors is investigated. We then propose the single-beam condition to suppress off-chip radiation loss. Finally, we present the design and validation of a [distributed Bragg deflector](#) beam expander in which the losses due to off-chip radiation are efficiently suppressed.

**Chapter 3:** Off-axis [curved waveguide grating \(CWG\)](#) operating under the single-beam condition are introduced. We present a novel design approach and we report experimental results. We also present a tunable [curved waveguide grating \(CWG\)](#) demultiplexer architecture that is experimentally validated. Finally, a [CWG](#) demultiplexer with a flattened passband is presented.

**Chapter 4:** A novel feeding architecture based on a deflector beam expander is described, which enables 2D beam steering while suppressing grating lobes. A theoretical analysis of the system is carried out. Finally, some promising preliminary experimental results are presented.

**Chapter 5:** The conclusions are drawn and future prospects are outlined.

**Appendix A:** Published articles supporting this Thesis.

**Appendix B:** The Spanish summary of this Thesis.

**Please bear in mind that there is one bibliography list per chapter.**



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

This Thesis focuses on the comprehensive study of integrated photonic couplers pertaining to the category of distributed Bragg deflectors (DBDs) and their implementation in the SOI platform. This device converts a channel waveguide mode into a slab confined beam by using a grating formed in the waveguide core. The DBD was first proposed by Stoll in 1978 [Stoll1978]. Stoll foresaw a multitude of applications of DBDs including beam expansion, polarization filtering, beam splitting and modulation. However, DBDs have typically suffered from high insertion losses that hindered their use in practical applications. In this Thesis, we develop strategies to dramatically reduce the excess loss and demonstrates various low-loss DBD-based devices in the SOI platform.

First, we developed various tools and methodologies for efficient analysis and design of DBD-based devices. Then, by using these new tools, we found out that off-chip radiation was the primary factor responsible for the excess loss observed in previous works. Subsequently, we proposed and developed an original design method based on the single-beam condition, which efficiently suppresses off-chip radiation thus yielding low-loss DBD devices. Based on these original approaches, a low-loss wavelength demultiplexer was designed and experimentally demonstrated. Demultiplexer thermal tunability and flattop response have also been investigated. Finally, we explored the use of DBD devices as feeding elements for grating-based surface-emitting antennas, an application that allows efficient generation of large-area and highly-directional free space beams generated on-chip.

In this introduction, silicon photonics (SiPh) is briefly presented and its main advantages and limitations are described. We then review the state of the art of some fundamental building blocks for which the developed DBDs could have a beneficial impact. Then, we describe the distributed Bragg deflector working principle and practical layout implementations. Finally, the most significant contributions of this Thesis are outlined.

## 1.1 Silicon photonics

### 1.1.1 Overview

Silicon photonics is the technology that allows to build high-density photonic integrated circuit (PIC) using the complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) process [Bogaerts2018; Rahim2018; Khan2019]. The idea of using silicon to make photonics devices was first proposed by Soref *et al.* in 1986 [Soref1986]. By using the CMOS compatible process, SiPh can attain low-cost mass-production as it leverages the existing semiconductor fabrication facilities and know-how that have been already developed by the integrated microelectronic industry, and applies them to PICs. Indeed, this has been proved by the commercial success of integrated silicon photonics that we have witnessed during the last decade [Siew2021; Thomson2016; Yole Développement2021].

Silicon photonics products have been commercialized since the late 90s. For in-

stance, in 1997 Bookham released a SiPh variable optical attenuator (VOA) based on a thick-SOI platform with notable commercial success [Rickman2014]. The SiPh market was first driven by the communication applications [Intel Corporation2021; Cisco Systems Inc2021b; MACOM2021; Shi2020b; Doerr2018] but market forecasts now point to major growth in healthcare and sensing as well as other non-communication applications [Yole Développement2021; Siew2021]. The latter include light detection and ranging (LIDAR) systems, indispensable for autonomous cars [Kim2021; Barrett2021], biosensors [Ikegami2021], quantum computing [Andersen2021], and on-chip optical gyroscopes [KVH Industries Inc2021], to name a few.

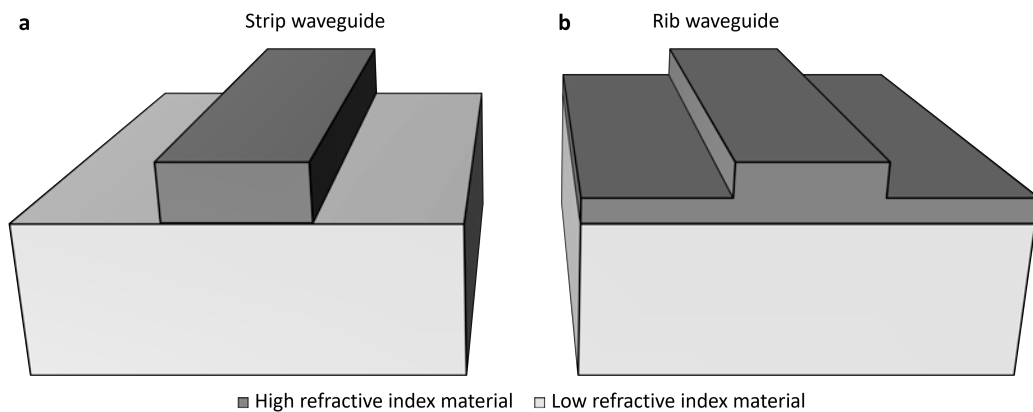
The silicon photonics industry is presently thriving. Product sales have been increasing and there have been billion-dollar acquisitions of SiPh companies by big players such as Nokia [Shi2020a], Cisco [Cisco Systems Inc2021a; Miller2018], Juniper [Hardy2016b], Ciena [Hardy2016a] or Nvidia [Newsroom2019], among others.

### 1.1.2 Silicon photonics platforms

Silicon photonics technology comes in various flavours. In fact, SiPh congregates many CMOS-compatible technological platforms, each characterized by specific material layers and different etch levels. The different SiPh material platforms include silicon-on-insulator (SOI), silicon nitride (SiN), germanium-on-insulator, germanium-on-silicon (GOS), Germanium-on-SOI, and GOS nitride, etc [Rahim2018].

The dominant SiPh platform is SOI which uses silicon and its native oxide, SiO<sub>2</sub>, as the main materials. A number of successful commercial products have been developed in SOI [Chen2018; Yole Développement2021]. SOI provides a very high index contrast ( $\Delta n \sim 2$ ) which allows miniaturization and high integration density. Both thin- and thick-SOI technology have been successfully developed [Rahim2018]. Thin-SOI waveguides have a silicon layer thickness of a few hundreds of nanometres, which allows single-mode operation using channel or strip waveguides (see Fig. 1.1(a)). Thick-SOI waveguides have a silicon layer on the micrometer scale which demand rib waveguides to ensure single-mode operation (see Fig. 1.1(b)). Thick-SOI rib waveguides historically required large bending radii (hundreds of micrometers) compared to thin-SOI channel waveguides (a few micrometres). Although micrometer-scale bend radii were demonstrated in multi-micron SOI waveguides [Cherchi2013; Aalto2019], they are based on strip multimode waveguides that require strip-rib mode converters of hundreds of micrometres long [Aalto2006] which significantly enlarge the total bend footprint and increases the loss. Bends based on total internal reflection (TIR) mirrors were also proposed for thick-SOI, but low-loss ( $< 0.1$  dB/90°) operation cannot be attained for both polarizations simultaneously [Aalto2015]. In thick-SOI platforms the comparatively large thickness of the silicon layer complicates the patterning of small features, the precise control of waveguide dimensions and the implementation of high-speed active components [Rahim2018]. Sub-micrometer SOI or thin-SOI platforms are usually preferred for complex circuits with a large component count. Luxtera chose a thin-SOI platform for the first commercial SiPh transceiver released to the market in 2007 [Greene2007]. SOI platform with 220 nm Si layer has been typically used and this is the target platform selected for the devices developed in this Thesis.





**Figure 1.1:** Most common waveguide structures in silicon photonics. a) Strip waveguide. b) Rib waveguide.

SiN is emerging as a complementary alternative to SOI [Blumenthal2018; Bucio2020]. SiN has low propagation loss and can sustain very high power densities as SiN does not suffer from the two-photon absorption that limits silicon power handling capabilities. Furthermore, SiN transparency window substantially exceeds that of silicon and includes the visible wavelengths. Nevertheless, the price to pay is integration density as the lower index contrast of SiN requires a larger bending radius compared to SOI. Both silicon and SiN waveguides can also be used simultaneously in the same platform, at the expense of increased fabrication complexity [Sacher2018; Rakowski2020].

### 1.1.3 Silicon photonics challenges

The main challenge for SiPh arises from its strongest asset: the CMOS compatibility. CMOS compatibility limits greatly the choice of materials that can be used, primarily silicon, and silicon dioxide and with further processing germanium and silicon nitride can be used. With this set of materials, it is possible to implement both passive and active devices, the latter including modulators and photodetectors [Yang2019; Benedikovic2019; Zhang2021; Vivien2012; Vivien2009; Gardes2009; Witzens2018; Reed2010; Sun2019]. However, using these materials, it is difficult to provide the optical gain required for laser sources, albeit encouraging results have been demonstrated in germanium on silicon [Camacho-Aguilera2012].

Optimization of passive devices would greatly benefit from availability of a continuum of refractive indices, while CMOS compatible materials only provide a discrete set of refractive indices. This restriction has been effectively resolved by using metamaterials based on sub-wavelength grating (SWG) structures. These nanophotonic structures, since their first demonstration in silicon waveguides [Cheben2006a; Schmid2011; Schmid2008; Schmid2007; Bock2009; Cheben2006b] have been advantageously used as a powerful tool for overcoming performance limitations of conventional silicon-based integrated photonic devices [Cheben2018; Halir2018; Luque-González2021b]. SWGs comprise a dielectric material with a grating period smaller than the wavelength, hence frustrating diffraction. The medium acts on a macroscopic level as a homogeneous

metamaterial, hence enabling to customize the medium optical properties through geometrical design. The small features required by SWG can be precisely patterned with the electron-beam (e-beam) lithography as well as deep-ultraviolet (UV) immersion lithography [Rakowski2020; CEA-Leti2021; imec2022a]. SWG metamaterials are of fundamental importance for this Thesis as they permit the refractive index engineering required for practical implementation of DBD devices, based on a single-etch process.

For active devices, the outstanding issue is that the CMOS compatible materials are not quite suitable for making efficient lasers in the near-infrared band which is used by virtually all telecom and datacom applications [Chen2018]. To circumvent this issue, III-V hybrid and heterogeneous integration has been used in practical applications [Liu2021; Szelag2019; Billah2018; Liang2021; Fahrenkopf2019].

### 1.1.4 The fab-less paradigm and Thesis contribution to advancing silicon photonics

The current global demand for silicon photonic chips is still tiny compared to the electronic chips market. In this situation, it is not economically viable for most companies to have a foundry dedicated exclusively to SiPh chips manufacturing. The fab-less model is typically used as the same foundry is shared by many customers thus lowering the industry entry cost for newcomers. In this model, a foundry provides chip fabrication services on a standardized platform that can be accessed openly by third party fab-less designers [Khan2019; Rahim2018; Siew2021]. Table 1.1 shows a list of open-access foundries and their technologies. The prototype devices developed in this Thesis were fabricated by an external foundry, Applied Nanotools.

The foundry typically provides a process design kit (PDK) to the designers which includes the platform technology description, design rules and optimized photonic devices among other data. A PDK customarily contains a library of photonic components that constitute the building blocks of complex photonics circuits. Designers may also design their custom components but the most basic functions such as power splitting, interconnection and coupling are commonly covered by the foundry's PDK. The most sophisticated PDK come with software components that can be plugged in to the most popular computer-aided design (CAD) software thus speeding the development and increasing the yield.

For this Thesis we used open-access foundry and developed new building blocks that can be used to develop complex PICs. This aligns with the main research lines of the Photonics & RF research group of the University of Málaga at which this PhD research was carried out. The work at this group has been dedicated to designing novel high-performance building blocks for SiPh [Luque-González2019; Halir2016; Pereira-Martín2021; Pérez-Armenta2020; Herrero-Bermello2020; Luque-González2020; Luque-González2021a; Sánchez-Postigo2021a; Sánchez-Postigo2021b; González-Andrade2021; Ginel-Moreno2020; Ginel-Moreno2021]. In this Thesis, we explored the opportunities provided by distributed Bragg deflector (DBD) to implement new building blocks for the SOI platform, specifically:

Foundry	Platform	Technology	Access	Waveguide Layer Thickness (nm)
<b>RAPID PROTOTYPING SERVICES</b>				
AMO	Thin-SOI SiN	e-beam	Direct	220,340 100-400
Applied Nanotools	Thin SOI SiN	e-beam	Direct	220, 300,500 400
CNM/VLC	SiN	e-beam	Direct	300
Cornerstone	Thin-SOI SiN Suspended Si	248 nm	Direct/Europractice	220,340,500 300 500
LIGENTEC	SiN	-	Direct	up to 2500
<b>CMOS PILOT LINES &amp; RESEARCH INSTITUTES</b>				
AIM (SUNY)	Thin-SOI SiN	193 nm immersion -	MOSIS	220 nm -
LIGENTEC	SiN	-	Direct	up to 2500
CEA-LETI	Thin-SOI Ge/SiGE SiN	193 nm immersion	CMP/Europractice	310 Up to 3000 800nm
IHP	SiGe BiCMOS	248 nm	Europractice	220
IMEC	Thin-SOI SiN	193 nm Immersion	Europractice Direct	220 -
INPHOTEC	Thin-SOI	e-beam	Direct	220
Sandia Lab	Thin-SOI SiN	- -	Direct	240 -
VTT	Thick-SOI	UV	Direct	3000
<b>INDUSTRIAL FABs</b>				
AMF	Thin SOI SiN SiN-on-SOI	193 nm 248 nm -	Direct/Europractice	220 400/600 -
CompoundTek	Thin SOI SiN	193 nm immersion	Direct	- -
GlobalFoundries	Thin SOI SiN	193 nm immersion	MOSIS, Direct, TAPO,Europractice	160 nm 300 nm
SiTerra	Thin SOI	-	Direct	-
SMIC	Thin SOI	-	Direct	340
ST Micro	Thin SOI SiN	193 nm immersion	Direct	300 600
Tower Semiconductor (Intel)	Thin SOI	193 nm	Direct	-
TSMC	Thin SOI	-	-	-
LioniX	SiN	UV	Direct/Europractice	flexible

**Table 1.1:** Examples of open-access silicon photonics technology platforms offered by various fabs. Europractice: [europractice-ic.com](http://europractice-ic.com), MOSIS: [themosiservice.com](http://themosiservice.com), CMP: [mycmp.fr](http://mycmp.fr), TAPO: [Trusted Access Program Office](http://TrustedAccessProgramOffice.com). Adapted from [Rahim2018] and updated with data from various sources ([Siew2021; IPSR-I2020; EURORACTICE2022], APNT:[Applied Nanotools Inc2022], CNM/VLC: [IMB-CNM2022], Cornerstone:[Littlejohns2020]; LIGENTEC: [LIGENTEC2022], AIM: [Fahrenkopf2019], CEA-LETI: [CEA-Leti2021], IHP: [IHP], IMEC: [imec2022b], INPHOTEC: [INPHOTEC], VTT: [Aalto2019], AMF:[AMF2022], CompoundTek: [CompoundTek2022], Global-Foundries: [Rakowski2020], ST Micro: [Boeuf2018], Tower Semiconductor: [Tower Semiconductor2018], LioniX: [Wörhoff2015])

**Beam shapers/expanders** Beam shaping is an essential function in integrated photonics. One of the most important beam shaping operations is spot-size conversion. Since SOI has a high index contrast, the fundamental mode size of interconnecting waveguides is small. Mode expansion is often required. This is typically performed by adiabatic tapers, metamaterial-based lenses [Luque-González2019], optimized shape tapers [Fu2014] or evanescent couplers [Kim2018; Ropp2021]. In this Thesis, we present a compact deflector-based device capable of expanding the waveguide mode with unprecedented compactness and efficiency. The device is also capable of shaping both the amplitude and phase of the generated field in a very compact footprint, while the phase control can provide additional interesting functionalities.

**Off-chip couplers** PICs require input/output interfaces which, due to waveguide dimensions, are challenging for silicon wire waveguides. High-quality input/output couplers are thus a key component in SiPh development [Vermeulen2018]. Most optical chip interfaces can be classified into three categories: fibre-to-chip, chip-to-chip, and free-space-to-chip coupling [Vermeulen2018]. Fibre-to-chip couplers are the most common as optical fibres are ubiquitous as a standard interconnecting medium for many applications. Free-space-to-chip couplers are important for light detection and ranging (LIDAR) and free-space communication systems where free-space beams need to be generated and received. Chip-to-chip couplers are increasingly used in heterogeneously integrated systems where other photonic technologies are combined with SiPh to provide extra functionalities ( e.g. light generation).

A straightforward solution to couple light to or from a photonic chip is through edge couplers. This approach is challenging when interfacing standard optical fibres due to the large mode-size difference between the fibre mode and on-chip waveguide mode. To address this, the most commonly used solutions are inverse tapers [Almeida2003] and sub-wavelength grating engineered edge couplers [Cheben2015]. Another approach is to use surface grating couplers [Taillaert2002; Taillaert2004; Taillaert2006; Cheben2006a; Halir2010; Alonso-Ramos2010; Watanabe2017; Benedikovic2017]. Unlike edge couplers, the surface grating couplers can be arbitrarily placed anywhere on the chip and allow wafer-scale testing [Mekis2011]. Surface grating couplers can also be used coupling between on-chip propagating modes and free-space beams. Arrays of surface grating couplers acting as optical antennas [Van Acoleyen2009; Van Acoleyen2011; Sun2013; Poulton2017; Ginel-Moreno2021], have been used in optical phased arrays (OPAs) for LIDAR systems [Kim2021]. These arrays generally have an element separation larger than the wavelength, which leads to generation of (undesired) grating lobes. In this Thesis, we present a new architecture based on DBD that permits a compact feeding of a wide grating coupler with efficiently suppressed grating lobes, while also allowing 2D steering of the output beam by thermo-optic effect.

**(De)multiplexers** Wavelength demultiplexing is a key function in modern wavelength division multiplexing (WDM) communication systems [Cheben2007; Okamoto2014; Shi2020b]. In WDM systems, a common optical guiding medium transmits various independent data streams (channels) each carried by a different wavelength. Demultiplexers act as wavelength filters capable of extracting each channel to

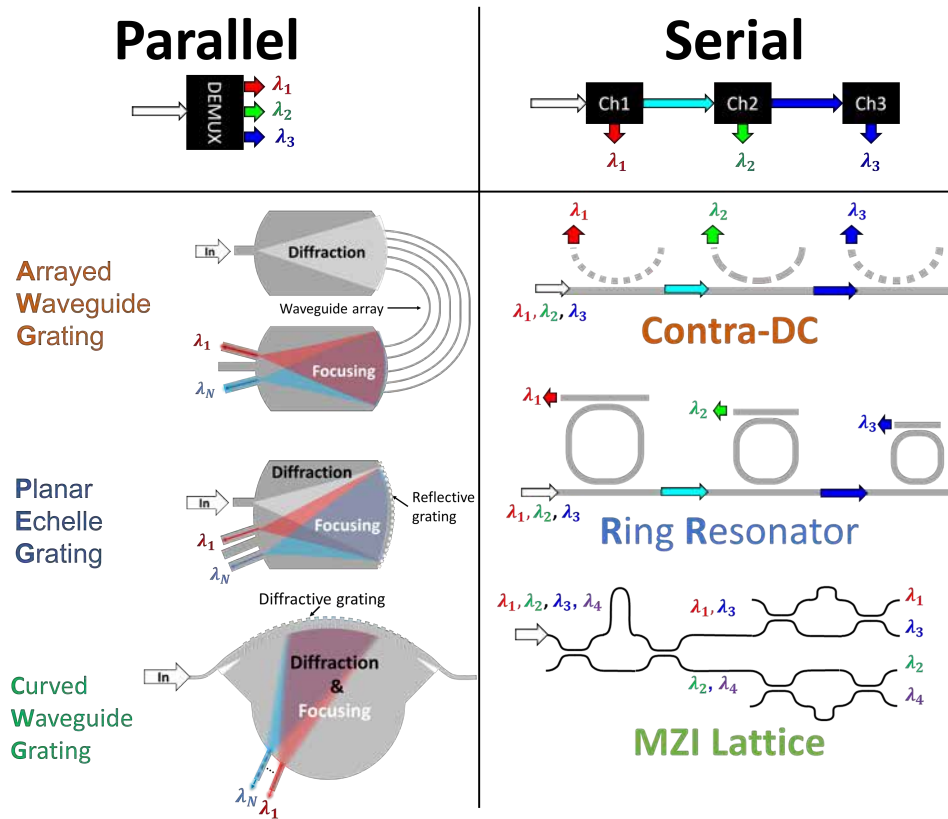
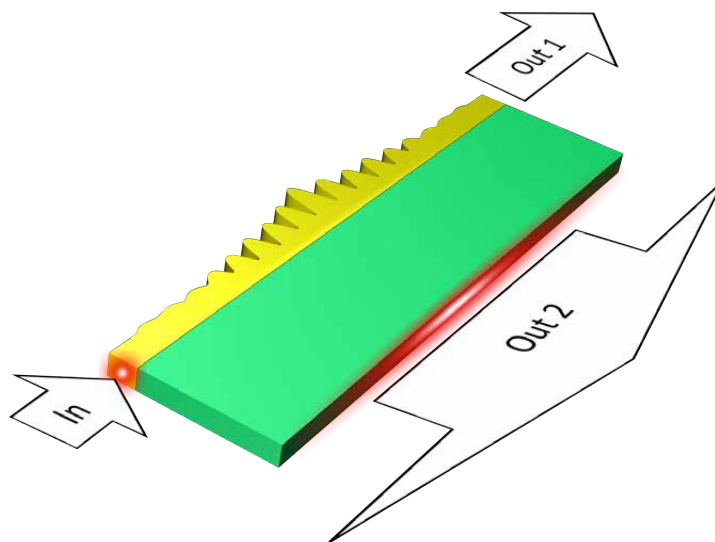


Figure 1.2: Serial and parallel demultiplexing architectures.

a dedicated waveguide for further processing. There are two general multiplexing/demultiplexing architectures: serial and parallel, as illustrated in Fig. 1.2. Serial architectures can extract/add one channel at a time and must be cascaded to extract various channels. These include Bragg filters [Cheben2019; Pereira-Martín2021; Pérez-Armenta2020], ring resonators, Mach-Zehnder interferometer (MZI) lattice filters [Horst2013; Han2019] and contra-directional couplers [Naghdi2018; Yun2019; Shi2013]. Parallel architectures can separate/combine various channels simultaneously, see Fig. 1.2. These include arrayed waveguide gratings (AWGs), echelle gratings (EGs) and CWG (de)multiplexers [Tondini2017; Okamoto2014; Bogaerts2010; Pathak2013; Melati2019; Melati2022; Pathak2014; Janz2004; Hao2006; Bock2008; Guerber2020]. CWG have been proposed and experimentally demonstrated with promising preliminary results. However, comparatively high losses hindered their practical implementations [Hao2006; Bock2008; Bock2012]. In this Thesis, we propose a new design strategy for CWG that greatly reduces losses making them a realistic alternative to conventional architectures. A complete CWG demultiplexer has been designed for the C band and experimental results confirm the low loss performance, as predicted by rigorous 3D finite-difference time-domain (FDTD) simulations.

## 1.2 Distributed Bragg Deflectors

In 1978 Stoll proposed a new multi-functional building block for integrated photonics: the distributed Bragg deflector (DBD) [Stoll1978]. The simplest embodiment of a DBD comprises a channel waveguide that is periodically perturbed to produce well-controlled diffraction into a slab waveguide adjacent to the channel, waveguide as shown in Fig. 1.3. The fundamental mode propagating through the channel waveguide is phase-matched to the lateral slab mode through the periodic perturbation. As a consequence, power transfer is enabled between the two modes, mediated by the diffraction produced by the periodic perturbation.



**Figure 1.3:** Schematic of a DBD based beam expander. The small mode size at the input is expanded to a wider beam confined in the lateral slab waveguide (Out2). This slab-confined beam may carry only a portion of the input power and the rest may remain in the channel waveguide and pass through (Out 1).

The immediate application of DBDs is the generation of a controlled beam confined in a slab waveguide. This capability can be leveraged directly to implement a compact beam expander such as the one depicted in Fig. 1.3. In this device, a highly confined mode (Fig. 1.3, "In") propagating in the channel waveguide comprising a grating perturbation is progressively diffracted towards the lateral slab as a wide Gaussian beam (Fig. 1.3, "Out 2"). In addition to the beam shaping power splitting can also be obtained as the power fraction coupled to the slab waveguide can readily be controlled by adjusting the grating strength. This function was experimentally demonstrated in [Davis2004] on a sol-gel platform. Similar devices have been recently reported leveraging lateral leakage rather than diffraction to couple light from a channel waveguide to a slab waveguide to achieve beam expansion [Kim2018; Ropp2021].

Grating-based deflectors are intrinsically wavelength dependent, hence they can be used to separate different wavelengths. In 1998 a spectrometer was demonstrated by Madsen and others, using a chirped grating patterned on a channel waveguide to couple light into a slab as a focusing beam [Madsen1998]. In Madsen's spectrometer,

the chirping is used to achieve focusing of the slab-confined beam. The beam focal point position moves as the wavelength changes due to the inherent dispersive nature of the waveguide grating. Based on this concept, Hao *et al.* proposed a new type of WDM demultiplexer: the curved waveguide grating. In the CWG, the waveguide grating is placed following a circular arc to achieve the focusing behaviour without chirping, hence, enlarging the bandwidth of operation [Hao2006]. This architecture was also implemented in the SOI platform and experimentally demonstrated at NRC Canada [Bock2008; Cheben2010; Velasco2012; Bock2012]. Although the demonstrated device was promising in terms of crosstalk and bandwidth, it had comparatively high losses that hindered its applications. In this Thesis, we successfully address these issues to implement an efficient WDM demultiplexer based on the curved waveguide grating architecture.

Last but not least, since deflectors in SOI are polarization sensitive devices, they can be readily used to implement polarization controlling functions [Stoll1978; Davis2004].

## 1.3 Thesis contributions

### 1.3.1 Direct contributions

The main objective of this Thesis was to demonstrate the usefulness of distributed Bragg deflector devices in the SOI platform for practical applications. First, we developed efficient tools and methodologies for analysing and designing DBD devices. Then we used these tools to investigate and reduce the losses that have previously hindered DBD applicability. Finally, we applied these optimized deflector designs to implement new devices that further extend the building block library of the SOI platform. Specifically, we have demonstrated a new type of beam expander, various demultiplexers and a wide optical antenna feeder. The most relevant contributions derived from this work are summarized below:

1. A new design technique was developed based on Floquet-Bloch mode analysis of a single period of the grating. Compared to 3D FDTD this technique greatly reduces the computational resources required to carry out the device design. An original Floquet-Bloch mode analysis tool, built upon a commercial 3D FDTD simulator [Synopsys Inc2020] and advanced spectral analysis techniques [Mandelsham2001], was also developed [Hadij-ElHouati2019c]. Subsequently, this tool was used to investigate the origin of high losses in previously reported SOI deflectors. It was found that the losses primarily originate in off-chip radiation, and it was demonstrated that losses can be reduced below 2 dB by judicious design [Hadij-ElHouati2019b; Hadij-ElHouati2019a]. Then, further loss reduction was accomplished by a radically new design strategy leveraging the so-called single-beam condition and by using a sub-wavelength metamaterial. In doing so the off-chip loss was almost completely suppressed and an unprecedentedly low design loss of 0.3 dB was demonstrated [Hadij-ElHouati2021a].
2. Based on the achievement outlined above, we designed and experimentally demonstrated a CWG wavelength demultiplexer that harnesses the single-beam condi-

tion to attain a very low insertion loss of  $\sim 1$  dB [Hadij-ElHouati2021b; Hadij-ElHouati2021c]. This demultiplexer required the deflector radiation to be directed off-axis far from the grating normal. As a result, traditional design procedures became unsuitable as they yielded high crosstalk and losses due to aberrations in the focal plane. A new design approach, based on reciprocity, was used to circumvent this problem. Several other design improvements have also been investigated: flattop spectral response was demonstrated by using bimodal output waveguides [Hadij-ElHouati2022]; and a thermally tunable CWG demultiplexer has been proposed by placing a heater on top of the DBD (not yet published). By heating the DBD the diffraction angle can be controlled for all wavelength channels simultaneously. These original ideas have been patented [Hadij El Houati2022b; Hadij El Houati2022a].

3. Yet another direct contribution of this Thesis is a new method for feeding wide optical antennas that enables 2D beam steering by combining wavelength and thermal tuning, opening exciting prospects for on-chip generation of steerable beams. Various complete wide optical antennas have been designed and fabricated. The fabricated devices experimental characterization was done by Mr. Pablo Ginel-Moreno. The results were recently published in a high-impact factor journal [Ginel-Moreno2022]. This invention is also protected in the patent [Hadij El Houati2022b; Hadij El Houati2022a].
4. The single-beam radiation effect discovered in this work has been followed up by other group members working on a new patent application on novel high efficiency input/output chip couplers.

### 1.3.2 Indirect contributions

The tools and techniques developed during this Thesis have been applied well beyond DBD devices. The know-how developed in this Thesis has proven useful for determining the sensitivity of SWG-based biochemical sensors [Wangüemert-Pérez2019], implementing millimetre-long antennas in SOI waveguides [Ginel-Moreno2020; Ginel-Moreno2021; Cheben2022], the design of a high-performance SWG metamaterial-based  $2 \times 4$  multi-mode interferometer (MMI) hybrid [Hadij-ElHouati2020b; Hadij-ElHouati2020a], and complex spectral filters [Pereira-Martín2021].

The expertise in the field of SiPh acquired by the candidate enabled him to contribute to a review on the SWG metamaterials for nanophotonic devices with engineered anisotropy [Luque-González2021b].



## 1.4 References

- [Aalto2006] T. Aalto, K. Solehmainen, M. Harjanne, M. Kapulainen, and P. Heimala. “Low-Loss Converters between Optical Silicon Waveguides of Different Sizes and Types”. In: *IEEE Photonics Technology Letters* 18.5 (Mar. 2006), pp. 709–711. ISSN: 1941-0174. DOI: [10.1109/LPT.2006.871150](https://doi.org/10.1109/LPT.2006.871150).
- [Aalto2015] T. Aalto, M. Harjanne, S. Ylinen, M. Kapulainen, T. Vehmas, and M. Cherchi. “Total Internal Reflection Mirrors with Ultra-Low Losses in 3  $\mu\text{m}$  Thick SOI Waveguides”. In: *Silicon Photonics X. Silicon Photonics X*. Vol. 9367. SPIE, Feb. 27, 2015, pp. 39–47. DOI: [10.1117/12.2079748](https://doi.org/10.1117/12.2079748).
- [Aalto2019] T. Aalto, M. Cherchi, M. Harjanne, S. Bhat, P. Heimala, F. Sun, M. Kapulainen, T. Hassinen, and T. Vehmas. “Open-Access 3- $\mu\text{m}$  SOI Waveguide Platform for Dense Photonic Integrated Circuits”. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 25.5 (Sept. 2019), pp. 1–9. ISSN: 1558-4542. DOI: [10.1109/JSTQE.2019.2908551](https://doi.org/10.1109/JSTQE.2019.2908551).
- [Almeida2003] V. R. Almeida, R. R. Panepucci, and M. Lipson. “Nanotaper for Compact Mode Conversion”. In: *Opt. Lett.*, *OL* 28.15 (Aug. 1, 2003), pp. 1302–1304. ISSN: 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.28.001302](https://doi.org/10.1364/OL.28.001302).
- [Alonso-Ramos2010] C. Alonso-Ramos, A. Ortega-Moñux, I. Molina-Fernández, P. Cheben, L. Zavargo-Peche, and R. Halir. “Efficient Fiber-to-Chip Grating Coupler for Micrometric SOI Rib Waveguides”. In: *Opt. Express* 18.14 (July 5, 2010), p. 15189. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.18.015189](https://doi.org/10.1364/OE.18.015189).
- [AMF2022] AMF. *Advanced Micro Foundry Brochure*. 2022. URL: <https://www.advmf.com/wp-content/uploads/2019/08/AMF-Brochure-Web.pdf> (visited on 03/28/2022).
- [Andersen2021] U. L. Andersen. “Photonic Chip Brings Optical Quantum Computers a Step Closer”. In: *Nature* 591.7848 (7848 Mar. 2021), pp. 40–41. DOI: [10.1038/d41586-021-00488-z](https://doi.org/10.1038/d41586-021-00488-z).
- [Applied Nanotools Inc2022] Applied Nanotools Inc. *Applied Nanotools Inc.* 2022. URL: <https://www.appliednt.com/> (visited on 03/29/2022).
- [Barrett2021] B. Barrett. “Mobileye Puts Lidar on a Chip—and Helps Map Intel’s Future”. In: *Wired* (Nov. 1, 2021). ISSN: 1059-1028. URL: <https://www.wired.com/story/mobileye-lidar-on-a-chip-intel/> (visited on 01/12/2022).
- [Benedikovic2017] D. Benedikovic, C. Alonso-Ramos, D. Pérez-Galacho, S. Guerber, V. Vakarin, G. Marcaud, X. Le Roux, E. Cassan, D. Marris-Morini, P. Cheben, F. Boeuf, C. Baudot, and L. Vivien. “L-Shaped Fiber-Chip Grating Couplers with High Directionality and Low Reflectivity Fabricated with Deep-UV Lithography”. In: *Optics Letters* 42.17 (Sept. 2017), pp. 3439–3442. ISSN: 0146-9592. DOI: [10.1364/OL.42.003439](https://doi.org/10.1364/OL.42.003439).
- [Benedikovic2019] D. Benedikovic, L. Virost, G. Aubin, F. Amar, B. Szelag, B. Karakus, J.-M. Hartmann, C. Alonso-Ramos, X. L. Roux, P. Crozat, E. Cassan, D. Marris-Morini, C. Baudot, F. Boeuf, J.-M. Fédéli, C. Kopp, and L. Vivien. “25 Gbps Low-Voltage Hetero-Structured Silicon-Germanium Waveguide Pin Photodetectors for Monolithic on-Chip Nanophotonic Architectures”. In: *Photon. Res.* 7.4 (Apr. 1, 2019), pp. 437–444. ISSN: 2327-9125. DOI: [10.1364/PRJ.7.000437](https://doi.org/10.1364/PRJ.7.000437).
- [Billah2018] M. R. Billah, M. Blaicher, T. Hoose, P.-I. Dietrich, P. Marin-Palomo, N. Lindenmann, A. Nesic, A. Hofmann, U. Troppenz, M. Moehrle, S. Randel, W. Freude, and C. Koos. “Hybrid Integration of Silicon Photonics Circuits and InP Lasers by Photonic Wire Bonding”. In: *Optica, OPTICA* 5.7 (July 20, 2018), pp. 876–883. ISSN: 2334-2536. DOI: [10.1364/OPTICA.5.000876](https://doi.org/10.1364/OPTICA.5.000876).

- [Blumenthal2018] D. J. Blumenthal, R. Heideman, D. Geuzebroek, A. Leinse, and C. Roeloffzen. “Silicon Nitride in Silicon Photonics”. In: *Proc. IEEE* 106.12 (Dec. 2018), pp. 2209–2231. ISSN: 0018-9219, 1558-2256. DOI: [10.1109/JPROC.2018.2861576](https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2861576).
- [Bock2008] P. J. Bock, P. Cheben, A. Delâge, J. H. Schmid, D.-X. Xu, S. Janz, and T. J. Hall. “Demultiplexer with Blazed Waveguide Sidewall Grating and Sub-Wavelength Grating Structure”. In: *Opt. Express* 16.22 (Oct. 27, 2008), p. 17616. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.16.017616](https://doi.org/10.1364/OE.16.017616).
- [Bock2009] P. J. Bock, P. Cheben, J. H. Schmid, A. Delâge, D.-X. Xu, S. Janz, and T. J. Hall. “Sub-Wavelength Grating Mode Transformers in Silicon Slab Waveguides”. In: *Opt. Express* 17.21 (Oct. 12, 2009), p. 19120. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.17.019120](https://doi.org/10.1364/OE.17.019120).
- [Bock2012] P. J. Bock, P. Cheben, J. H. Schmid, A. V. Velasco, A. Delâge, S. Janz, D.-X. Xu, J. Lapointe, T. J. Hall, and M. L. Calvo. “Demonstration of a Curved Sidewall Grating Demultiplexer on Silicon”. In: *Opt. Express* 20.18 (Aug. 27, 2012), p. 19882. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.20.019882](https://doi.org/10.1364/OE.20.019882).
- [Boeuf2018] F. Boeuf. *Silicon Photonics : Industrial Reality and Future Evolutions*. STMICROELECTRONICS, 2018. URL: [https://www.leti-cea.com/cea-tech/leti/english/Documents/pres-WS-LID-2018/Photonic/01\\_silicon\\_Photonics\\_overview\\_LETI\\_DAYS\\_2018.pdf](https://www.leti-cea.com/cea-tech/leti/english/Documents/pres-WS-LID-2018/Photonic/01_silicon_Photonics_overview_LETI_DAYS_2018.pdf).
- [Bogaerts2010] W. Bogaerts, S. K. Selvaraja, P. Dumon, J. Brouckaert, K. De Vos, D. Van Thourhout, and R. Baets. “Silicon-on-Insulator Spectral Filters Fabricated With CMOS Technology”. In: *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* 16.1 (2010), pp. 33–44. ISSN: 1077-260X. DOI: [10.1109/JSTQE.2009.2039680](https://doi.org/10.1109/JSTQE.2009.2039680).
- [Bogaerts2018] W. Bogaerts and L. Chrostowski. “Silicon Photonics Circuit Design: Methods, Tools and Challenges”. In: *Laser & Photonics Reviews* 12.4 (Apr. 2018), p. 1700237. ISSN: 18638880. DOI: [10.1002/lpor.201700237](https://doi.org/10.1002/lpor.201700237).
- [Bucio2020] T. Bucio, C. Lacava, M. Clementi, J. Faneca, I. Skandalos, A. Baldycheva, M. Galli, K. Debnath, P. Petropoulos, and F. Gardes. “Silicon Nitride Photonics for the Near-Infrared”. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 26.2 (2020). ISSN: 0792-1233. DOI: [10.1109/JSTQE.2019.2934127](https://doi.org/10.1109/JSTQE.2019.2934127).
- [Camacho-Aguilera2012] R. E. Camacho-Aguilera, Y. Cai, N. Patel, J. T. Bessette, M. Romagnoli, L. C. Kimerling, and J. Michel. “An Electrically Pumped Germanium Laser”. In: *Opt. Express, OE* 20.10 (May 7, 2012), pp. 11316–11320. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.20.011316](https://doi.org/10.1364/OE.20.011316).
- [CEA-Leti2021] CEA-Leti. *Silicon Photonics*. CEA/Leti (english). Mar. 12, 2021. URL: <https://www.cea.fr/cea-tech/leti/english/Pages/Applied-Research/Technology-Fields/Silicon-Photonics.aspx> (visited on 03/24/2022).
- [Cheben2006a] P. Cheben, S. Janz, D.-X. Xu, B. Lamontagne, A. Delage, and S. Tanev. “A Broad-Band Waveguide Grating Coupler with a Subwavelength Grating Mirror”. In: *IEEE Photonics Technology Letters* 18.1 (Jan. 2006), pp. 13–15. ISSN: 1941-0174. DOI: [10.1109/LPT.2005.860037](https://doi.org/10.1109/LPT.2005.860037).
- [Cheben2006b] P. Cheben, D.-X. Xu, S. Janz, and A. Densmore. “Subwavelength Waveguide Grating for Mode Conversion and Light Coupling in Integrated Optics”. In: *Opt. Express* 14.11 (2006), p. 4695. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.14.004695](https://doi.org/10.1364/OE.14.004695).

- [Cheben2007] P. Cheben. “Wavelength Dispersive Planar Waveguide Devices: Echelle and Arrayed Waveguide Gratings”. In: *Optical Waveguides: From Theory to Applied Technologies*. Ed. by M. L. Calvo and V. Lakshminarayanan. 1st ed. CRC Press, 2007, pp. 173–230. ISBN: 978-1-315-22134-2. DOI: [10.1201/9781315221342-5](https://doi.org/10.1201/9781315221342-5).
- [Cheben2010] P. Cheben, P. J. Bock, J. H. Schmid, J. Lapointe, S. Janz, D.-X. Xu, A. Densmore, A. Delâge, B. Lamontagne, and T. J. Hall. “Refractive Index Engineering with Subwavelength Gratings for Efficient Microphotonic Couplers and Planar Waveguide Multiplexers”. In: *Opt. Lett., OL* 35.15 (Aug. 1, 2010), pp. 2526–2528. ISSN: 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.35.002526](https://doi.org/10.1364/OL.35.002526).
- [Cheben2015] P. Cheben, J. H. Schmid, S. Wang, D.-X. Xu, M. Vachon, S. Janz, J. Lapointe, Y. Painchaud, and M.-J. Picard. “Broadband Polarization Independent Nanophotonic Coupler for Silicon Waveguides with Ultra-High Efficiency”. In: *Opt. Express* 23.17 (Aug. 24, 2015), p. 22553. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.23.022553](https://doi.org/10.1364/OE.23.022553).
- [Cheben2018] P. Cheben, R. Halir, J. H. Schmid, H. A. Atwater, and D. R. Smith. “Subwavelength Integrated Photonics”. In: *Nature* 560.7720 (Aug. 2018), pp. 565–572. ISSN: 0028-0836, 1476-4687. DOI: [10.1038/s41586-018-0421-7](https://doi.org/10.1038/s41586-018-0421-7).
- [Cheben2019] P. Cheben, J.  tyrok y, J. H. Schmid, S. Wang, J. Lapointe, J. G. Wangüemert-Pérez,  . Molina-Fernández, A. Ortega-Mo ux, R. Halir, D. Melati, D. Xu, S. Janz, and M. Dado. “Bragg Filter Bandwidth Engineering in Subwavelength Grating Metamaterial Waveguides”. In: *Opt. Lett., OL* 44.4 (Feb. 15, 2019), pp. 1043–1046. ISSN: 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.44.001043](https://doi.org/10.1364/OL.44.001043).
- [Cheben2022] P. Cheben, J. H. Schmid, P. Ginel-Moreno, D. Pereira-Martin, A. Hadij-Elhouati, W. N. Ye, D. Melati, D.-X. Xu, S. Janz, A. Sanchez-Postigo, A. Ortega-Monux, I. Molina-Fernandez, and J. G. Wangueemert-Perez. “Waveguide Antenna”. Pat. WO2022013779A1 (WO). National Research Council Of Canada. Jan. 20, 2022. URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=W02022013779> (visited on 07/21/2022).
- [Chen2018] X. Chen, M. M. Milosevic, S. Stankovi c, S. Reynolds, T. D. Bucio, K. Li, D. J. Thomson, F. Gardes, and G. T. Reed. “The Emergence of Silicon Photonics as a Flexible Technology Platform”. In: *Proceedings of the IEEE* 106.12 (Dec. 2018), pp. 2101–2116. ISSN: 1558-2256. DOI: [10.1109/JPROC.2018.2854372](https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2854372).
- [Cherchi2013] M. Cherchi, S. Ylinen, M. Harjanne, M. Kapulainen, and T. Aalto. “Dramatic Size Reduction of Waveguide Bends on a Micron-Scale Silicon Photonic Platform”. In: *Opt. Express, OE* 21.15 (July 29, 2013), pp. 17814–17823. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.21.017814](https://doi.org/10.1364/OE.21.017814).
- [Cisco Systems Inc2021a] Cisco Systems Inc. *Cisco Completes Acquisition of Acacia Communications, Inc.* Cisco. Mar. 1, 2021. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/about/corporate-strategy-office/acquisitions/acacia.html> (visited on 07/15/2021).
- [Cisco Systems Inc2021b] Cisco Systems, Inc. *Optical Transceivers, Pluggables.* Cisco. 2021. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/interfaces-modules/transceiver-modules/index.html> (visited on 06/28/2021).
- [CompoundTek2022] CompoundTek. *Silicon Photonics Solutions.* 2022. URL: <https://compoundtek.com/our-solutions/> (visited on 03/29/2022).

- [Davis2004] R. Davis, W. Long, C.-J. Wang, T. Lam, J. Ho, P. Nachman, J. Poylio, O. Mishechkin, and M. Fallahi. “Distributed Bragg Deflectors Fabricated in Sol-Gel Based Waveguides”. In: *IEEE Photonics Technology Letters* 16.2 (Feb. 2004), pp. 464–466. ISSN: 1941-0174. DOI: [10.1109/LPT.2003.821255](https://doi.org/10.1109/LPT.2003.821255).
- [Doerr2018] C. Doerr and L. Chen. “Silicon Photonics in Optical Coherent Systems”. In: *Proc. IEEE* 106.12 (Dec. 2018), pp. 2291–2301. ISSN: 0018-9219, 1558-2256. DOI: [10.1109/JPROC.2018.2866391](https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2866391).
- [EUROPRACTICE2022] EUROPRACTICE. *EUROPRACTICE Photonics Portfolio*. 2022. URL: <https://euopractice-ic.com/technologies/photonics/> (visited on 03/29/2022).
- [Fahrenkopf2019] N. M. Fahrenkopf, C. McDonough, G. L. Leake, Z. Su, E. Timurdogan, and D. D. Coolbaugh. “The AIM Photonics MPW: A Highly Accessible Cutting Edge Technology for Rapid Prototyping of Photonic Integrated Circuits”. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 25.5 (Sept. 2019), pp. 1–6. ISSN: 1558-4542. DOI: [10.1109/JSTQE.2019.2935698](https://doi.org/10.1109/JSTQE.2019.2935698).
- [Fu2014] Y. Fu, T. Ye, W. Tang, and T. Chu. “Efficient Adiabatic Silicon-on-Insulator Waveguide Taper”. In: *Photon. Res.* 2.3 (June 1, 2014), A41. ISSN: 2327-9125. DOI: [10.1364/PRJ.2.000A41](https://doi.org/10.1364/PRJ.2.000A41).
- [Gardes2009] F. Gardes, A. Brimont, P. Sanchis, G. Rasigade, D. Marris-Morini, L. O’Faolain, F. Dong, J. Fedeli, P. Dumon, L. Vivien, T. Krauss, G. Reed, and J. Martí. “High-Speed Modulation of a Compact Silicon Ring Resonator Based on a Reverse-Biased Pn Diode”. In: *Optics Express* 17.24 (2009), pp. 21986–21991. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.17.021986](https://doi.org/10.1364/OE.17.021986).
- [Ginel-Moreno2020] P. Ginel-Moreno, D. Pereira-Martín, A. Hadij-ElHouati, W. N. Ye, D. Melati, D.-X. Xu, S. Janz, A. Ortega-Moñux, J. G. Wangüemert-Pérez, R. Halir, Í. Molina-Fernández, J. H. Schmid, and P. Cheben. “Highly Efficient Optical Antenna with Small Beam Divergence in Silicon Waveguides”. In: *Opt. Lett.* 45.20 (Oct. 15, 2020), p. 5668. ISSN: 0146-9592, 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.404012](https://doi.org/10.1364/OL.404012).
- [Ginel-Moreno2021] P. Ginel-Moreno, A. Sánchez-Postigo, J. de-Oliva-Rubio, A. Hadij-ElHouati, W. N. Ye, J. G. Wangüemert-Pérez, Í. Molina-Fernández, J. H. Schmid, P. Cheben, and A. Ortega-Moñux. “Millimeter-Long Metamaterial Surface-Emitting Antenna in the Silicon Photonics Platform”. In: *Opt. Lett., OL* 46.15 (Aug. 1, 2021), pp. 3733–3736. ISSN: 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.431983](https://doi.org/10.1364/OL.431983).
- [Ginel-Moreno2022] P. Ginel-Moreno, A. Hadij-ElHouati, A. Sánchez-Postigo, J. G. Wangüemert-Pérez, Í. Molina-Fernández, J. H. Schmid, P. Cheben, and A. Ortega-Moñux. “On-Chip Metamaterial Antenna Array with Distributed Bragg Deflector for Generation of Collimated Steerable Beams”. In: *Laser & Photonics Reviews* (July 3, 2022), p. 2200164. ISSN: 1863-8880, 1863-8899. DOI: [10.1002/lpor.202200164](https://doi.org/10.1002/lpor.202200164).
- [González-Andrade2021] D. González-Andrade, R. F. de Cabo, J. Vilas, I. Olivares, A. Dias, J. M. Luque-González, J. G. Wangüemert-Pérez, A. Ortega-Moñux, Í. Molina-Fernández, R. Halir, P. Cheben, and A. V. Velasco. “Mode Converter and Multiplexer With a Subwavelength Phase Shifter for Extended Broadband Operation”. In: *IEEE Photonics Technology Letters* 33.22 (Nov. 2021), pp. 1262–1265. ISSN: 1941-0174. DOI: [10.1109/LPT.2021.3116439](https://doi.org/10.1109/LPT.2021.3116439).
- [Greene2007] K. Greene. *Silicon Photonics Comes to Market*. MIT Technology Review. Aug. 16, 2007. URL: <https://www.technologyreview.com/2007/08/16/224040/silicon-photonics-comes-to-market/> (visited on 07/15/2021).

- [Guerber2020] S. Guerber, C. A. Alonso-Ramos, X. Le Roux, N. Vulliet, E. Cassan, D. Marris-Morini, F. Boeuf, and L. Vivien. “Polarization Independent and Temperature Tolerant AWG Based on a Silicon Nitride Platform”. In: *Opt. Lett.* 45.23 (Dec. 1, 2020), p. 6559. ISSN: 0146-9592, 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.411332](https://doi.org/10.1364/OL.411332).
- [Hadij El Houati2022a] A. Hadij El Houati, F. Í. Molina, J. G. Wanguemert Pérez, A. Ortega Moñux, and R. Halir. “Single-Beam Side Deflector, Multiplexer/Demultiplexer and Optical Antenna Feeder Incorporating the Deflector, and Methods That Use Same”. Pat. WO2022117902A1. Universidad de Malaga. June 9, 2022. URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/081810273/publication/WO2022117902A1?q=pn%3DW02022117902A1>.
- [Hadij El Houati2022b] A. Hadij El Houati, I. Molina Fernandez, J. G. Wanguemert Pérez, A. Ortega Moñux, and R. Halir. “Deflector Lateral De Haz Unico, Multiplexor/Demultiplexor Y Dispositivo Alimentador De Antena Optica Que Incorporan El Deflector, Y Metodos Que Los Utilizan”. Pat. ES2913576A1. Universidad Malaga. June 2, 2022. URL: <http://invenes.oepm.es/InvenesWeb/detalle?referencia=PCT/ES2021/070865>.
- [Hadij-ElHouati2019a] A. Hadij-ElHouati, P. Cheben, A. Ortega-Moñux, J. G. Wangüemert-Pérez, R. Halir, J. H. Schmid, and Í. Molina-Fernández. “Diffractive Sidewall Grating Coupler: Towards 2D Free-Space Optics on Chip”. In: *Integrated Optics: Design, Devices, Systems, and Applications v.* Ed. by P. Cheben, J. Čtyroký, and I. Molina-Fernández. Vol. 11031. International Society for Optics and Photonics. SPIE, 2019, pp. 78–86. DOI: [10.1117/12.2522471](https://doi.org/10.1117/12.2522471).
- [Hadij-ElHouati2019b] A. Hadij-ElHouati, P. Cheben, A. Ortega-Moñux, J. G. Wangüemert-Pérez, R. Halir, J. H. Schmid, and Í. Molina-Fernández. “Distributed Bragg Deflector Coupler for On-Chip Shaping of Optical Beams”. In: *Opt. Express* 27.23 (Nov. 11, 2019), pp. 33180–33193. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.27.033180](https://doi.org/10.1364/OE.27.033180).
- [Hadij-ElHouati2019c] A. Hadij-ElHouati, P. Cheben, A. Ortega-Moñux, J. G. Wangüemert-Pérez, R. Halir, J. H. Schmid, and I. Molina-Fernández. “Efficient Floquet-Bloch Analysis of Electrically Long Quasi-Periodic Devices”. In: XXVII International Workshop on Optical Waveguide Theory and Numerical Modelling (OWTNM. Málaga, May 10, 2019. URL: [https://www.owtnm.eu/Proceedings/malaga\\_2019.pdf](https://www.owtnm.eu/Proceedings/malaga_2019.pdf).
- [Hadij-ElHouati2020a] A. Hadij-ElHouati, R. Halir, A. Ortega-Moñux, J. G. Wanguemert-Perez, H. Podmore, J. H. Schmid, P. Cheben, and I. Molina-Fernandez. “Metamaterial Engineered C+L Band 90° Hybrid with 150 Nm Feature Size”. In: Sept. 28, 2020. URL: <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/20512> (visited on 12/22/2021).
- [Hadij-ElHouati2020b] A. Hadij-ElHouati, R. Halir, A. Ortega-Moñux, J. G. Wangüemert-Pérez, H. Podmore, J. H. Schmid, P. Cheben, and Í. Molina-Fernández. “Híbrido de 90° de Banda Ultra-Ancha, Basado En Tecnología Sub-Longitud de Onda, Compatible Con Fabricación Litográfica En La Plataforma Fotónica de Silicio”. In: XXXV Simposio Nacional de La Unión Científica Internacional de Radio (URSI). Virtual Conference, Sept. 4, 2020.
- [Hadij-ElHouati2021a] A. Hadij-ElHouati, P. Cheben, A. Ortega-Moñux, J. G. Wangüemert-Pérez, R. Halir, J. de Oliva Rubio, J. H. Schmid, and I. Molina-Fernández. “High-Efficiency Conversion from Waveguide Mode to on-Chip Beam Using a Metamaterial Engineered Bragg Deflector”. In: *Opt. Lett.* 46.10 (May 15, 2021), pp. 2409–2412. ISSN: 0146-9592, 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.420993](https://doi.org/10.1364/OL.420993).

- [Hadij-ElHouati2021b] A. Hadij-ElHouati, A. Ortega-Moñux, J. G. Wangüemert-Pérez, R. Halir, S. Wang, J. H. Schmid, P. Cheben, and I. Molina-Fernández. “Low-Loss off-Axis Curved Waveguide Grating Demultiplexer”. In: *Opt. Lett.* 46.19 (Oct. 1, 2021), p. 4821. ISSN: 0146-9592, 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.434294](https://doi.org/10.1364/OL.434294).
- [Hadij-ElHouati2021c] A. Hadij-ElHouati, A. Ortega-Moñux, J. G. Wangüemert-Pérez, R. Halir, S. Wang, J. H. Schmid, P. Cheben, and Í. Molina-Fernández. “Low-Loss Curved Waveguide Grating Wavelength Demultiplexer”. In: *EOS Annual Meeting (EOSAM) 2021*. EOS Annual Meeting (EOSAM) 2021. Rome, Italy, 2021. URL: <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/22897> (visited on 12/22/2021).
- [Hadij-ElHouati2022] A. Hadij-ElHouati, A. Ortega-Moñux, J. G. Wangüemert-Pérez, R. Halir, J. H. Schmid, P. Cheben, and I. Molina-Fernández. “Curved Waveguide Grating Demultiplexer (CWG) with Flattened Response via Bimodal Output Waveguides”. In: *23rd European Conference on Integrated Optics (ECIO 2022)*. 23rd European Conference on Integrated Optics (ECIO 2022). May 4, 2022.
- [Halir2010] R. Halir, P. Cheben, J. H. Schmid, R. Ma, D. Bedard, S. Janz, D.-X. Xu, A. Densmore, J. Lapointe, and Í. Molina-Fernández. “Continuously Apodized Fiber-to-Chip Surface Grating Coupler with Refractive Index Engineered Subwavelength Structure”. In: *Opt. Lett.* 35.19 (Oct. 1, 2010), p. 3243. ISSN: 0146-9592, 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.35.003243](https://doi.org/10.1364/OL.35.003243).
- [Halir2016] R. Halir, P. Cheben, J. M. Luque-González, J. D. Sarmiento-Merenguel, J. H. Schmid, G. Wangüemert-Pérez, D.-X. Xu, S. Wang, A. Ortega-Moñux, and Í. Molina-Fernández. “Ultra-broadband Nanophotonic Beamsplitter Using an Anisotropic Sub-wavelength Metamaterial”. In: *Laser & Photonics Reviews* 10.6 (Nov. 2016), pp. 1039–1046. ISSN: 1863-8880, 1863-8899. DOI: [10.1002/lpor.201600213](https://doi.org/10.1002/lpor.201600213).
- [Halir2018] R. Halir, A. Ortega-Monux, D. Benedikovic, G. Z. Mashanovich, J. G. Wangüemert-Perez, J. H. Schmid, I. Molina-Fernandez, and P. Cheben. “Subwavelength-Grating Metamaterial Structures for Silicon Photonic Devices”. In: *Proc. IEEE* 106.12 (Dec. 2018), pp. 2144–2157. ISSN: 0018-9219, 1558-2256. DOI: [10.1109/JPROC.2018.2851614](https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2851614).
- [Han2019] L. Han, B. P.-P. Kuo, A. Pejkcic, N. Alic, and S. Radic. “50GHz Silicon Cascaded Mach-Zehnder Wavelength Filter and Automatic Phase Error Correction”. In: *2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Mar. 2019, pp. 1–3.
- [Hao2006] Y. Hao, Y. Wu, J. Yang, X. Jiang, and M. Wang. “Novel Dispersive and Focusing Device Configuration Based on Curved Waveguide Grating (CWG)”. In: *Opt. Express* 14.19 (2006), p. 8630. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.14.008630](https://doi.org/10.1364/OE.14.008630).
- [Hardy2016a] S. Hardy. *Ciena Buys TeraXion’s Indium Phosphide, Silicon Photonics Assets*. Lightwave. Jan. 19, 2016. URL: <https://www.lightwaveonline.com/business/mergers-acquisitions/article/16654273/ciena-buys-teraxions-indium-phosphide-silicon-photonics-assets> (visited on 07/15/2021).
- [Hardy2016b] S. Hardy. *Juniper Networks to Buy Silicon Photonics Company Aurrion*. Lightwave. Aug. 3, 2016. URL: <https://www.lightwaveonline.com/business/mergers-acquisitions/article/16654159/juniper-networks-to-buy-silicon-photonics-company-aurrion> (visited on 07/15/2021).

- [Herrero-Bermello2020] A. Herrero-Bermello, A. Herrero-Bermello, A. Dias-Ponte, J. M. Luque-González, A. Ortega-Moñux, A. V. Velasco, P. Cheben, and R. Halir. “Experimental Demonstration of Metamaterial Anisotropy Engineering for Broadband On-Chip Polarization Beam Splitting”. In: *Opt. Express*, OE 28.11 (May 25, 2020), pp. 16385–16393. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.389070](https://doi.org/10.1364/OE.389070).
- [Horst2013] F. Horst, W. M. Green, S. Assefa, S. M. Shank, Y. A. Vlasov, and B. J. Offrein. “Cascaded Mach-Zehnder Wavelength Filters in Silicon Photonics for Low Loss and Flat Pass-Band WDM (de-)Multiplexing”. In: *Opt. Express* 21.10 (May 20, 2013), p. 11652. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.21.011652](https://doi.org/10.1364/OE.21.011652).
- [IHP] IHP. *IHP:SiGe BiCMOS and Silicon Photonics Technologies*. URL: <https://www.ihp-microelectronics.com/services/research-and-prototyping-service/mpw-prototyping-service/sigec-bicmos-technologies> (visited on 03/29/2022).
- [Ikegami2021] S. Ikegami, R. C. Benirschke, H. Fakhrai-Rad, M. H. Motamedi, R. Hockett, S. David, H. K. Lee, J. Kang, and T. J. Gniadek. “Target Specific Serologic Analysis of COVID-19 Convalescent Plasma”. In: *PLOS ONE* 16.4 (Apr. 28, 2021), e0249938. ISSN: 1932-6203. DOI: [10.1371/journal.pone.0249938](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249938).
- [IMB-CNM2022] IMB-CNM. *Silicon Nitride Photonic Integration Platform | IMB CNM*. 2022. URL: <https://www.imb-cnm.csic.es/en/micro-and-nanofabrication-clean-room/silicon-nitride-photonic-integration-platform> (visited on 03/29/2022).
- [imec2022a] imec. *Imec’s Silicon Photonics Platform Services*. Mar. 24, 2022. URL: <https://www.imec-int.com/sites/default/files/imported/SILICON-PHOTONICS-V06.pdf> (visited on 03/24/2022).
- [imec2022b] imec. *Integrated Photonics | Imec*. 2022. URL: <https://www.imec-int.com/en/integrated-photonics> (visited on 03/29/2022).
- [INPHOTEC] INPHOTEC. *Silicon Photonics*. URL: [https://www.inphotec.it/technology\\_post\\_type/silicon-photonics-2/](https://www.inphotec.it/technology_post_type/silicon-photonics-2/) (visited on 03/29/2022).
- [Intel Corporation2021] Intel Corporation. *Intel® Silicon Photonics Optical Transceiver Products*. Intel. 2021. URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/network-io/high-performance-fabrics/silicon-photonics.html> (visited on 06/28/2021).
- [IPSR-I2020] IPSR-I. *2020 Integrated Photonic Systems Roadmap - International (IPSR-I) : Silicon Photonics*. Integrated Photonics Systems Roadmap – International, 2020. URL: <https://photonicsmanufacturing.org> (visited on 03/29/2022).
- [Janz2004] S. Janz, A. Balakrishnan, S. Charbonneau, P. Cheben, M. Cloutier, A. Delage, K. Dossou, L. Erickson, M. Gao, P. Krug, B. Lamontagne, M. Packirisamy, M. Pearson, and D.-X. Xu. “Planar Waveguide Echelle Gratings in Silica-on-Silicon”. In: *IEEE Photonics Technology Letters* 16.2 (Feb. 2004), pp. 503–505. ISSN: 1941-0174. DOI: [10.1109/LPT.2003.823139](https://doi.org/10.1109/LPT.2003.823139).
- [Khan2019] M. U. Khan, Y. Xing, Y. Ye, and W. Bogaerts. “Photonic Integrated Circuit Design in a Foundry+Fabless Ecosystem”. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 25.5 (Sept. 2019), pp. 1–14. ISSN: 1558-4542. DOI: [10.1109/JSTQE.2019.2918949](https://doi.org/10.1109/JSTQE.2019.2918949).
- [Kim2018] S. Kim, D. A. Westly, B. J. Roxworthy, Q. Li, A. Yulaev, K. Srinivasan, and V. A. Aksyuk. “Photonic Waveguide to Free-Space Gaussian Beam Extreme Mode Converter”. In: *Light Sci Appl* 7.1 (Dec. 2018), p. 72. ISSN: 2047-7538. DOI: [10.1038/s41377-018-0073-2](https://doi.org/10.1038/s41377-018-0073-2).

- [Kim2021] I. Kim, R. J. Martins, J. Jang, T. Badloe, S. Khadir, H.-Y. Jung, H. Kim, J. Kim, P. Genevet, and J. Rho. “Nanophotonics for Light Detection and Ranging Technology”. In: *Nat. Nanotechnol.* 16.5 (5 May 2021), pp. 508–524. ISSN: 1748-3395. DOI: [10.1038/s41565-021-00895-3](https://doi.org/10.1038/s41565-021-00895-3).
- [KVH Industries Inc2021] KVH Industries, Inc. *KVH Introduces P-series IMUs with PIC Technology and New Accelerometers*. Apr. 27, 2021. URL: <https://www.kvh.com/press-room/press-releases/2021/210427-kvh-introduces-p-series-imus-with-pic-technology-and-new-accelerometers> (visited on 06/04/2021).
- [Liang2021] D. Liang and J. E. Bowers. “Recent Progress in Heterogeneous III-V-on-Silicon Photonic Integration”. In: *gxjzz* 2.1 (Mar. 1, 2021), pp. 59–83. ISSN: 2689-9620. DOI: [10.37188/lam.2021.005](https://doi.org/10.37188/lam.2021.005).
- [LIGENTEC2022] LIGENTEC. *All Nitride Technology*. 2022. URL: <https://www.ligentec.com/ligentec-an-technology/> (visited on 03/29/2022).
- [Littlejohns2020] C. G. Littlejohns, D. J. Rowe, H. Du, K. Li, W. Zhang, W. Cao, T. Dominguez Bucio, X. Yan, M. Banakar, D. Tran, S. Liu, F. Meng, B. Chen, Y. Qi, X. Chen, M. Nedeljkovic, L. Mastronardi, R. Maharjan, S. Bohora, A. Dhakal, I. Crowe, A. Khurana, K. C. Balram, L. Zagaglia, F. Floris, P. O’Brien, E. Di Gaetano, H. M. Chong, F. Y. Gardes, D. J. Thomson, G. Z. Mashanovich, M. Sorel, and G. T. Reed. “CORNERSTONE’s Silicon Photonics Rapid Prototyping Platforms: Current Status and Future Outlook”. In: *Applied Sciences* 10.22 (Nov. 19, 2020), p. 8201. ISSN: 2076-3417. DOI: [10.3390/app10228201](https://doi.org/10.3390/app10228201).
- [Liu2021] S. Liu and A. Khope. “Latest Advances in High-Performance Light Sources and Optical Amplifiers on Silicon”. In: *J. Semicond.* 42.4 (Apr. 1, 2021), p. 041307. ISSN: 1674-4926, 2058-6140. DOI: [10.1088/1674-4926/42/4/041307](https://doi.org/10.1088/1674-4926/42/4/041307).
- [Luque-González2019] J. M. Luque-González, R. Halir, J. G. Wangüemert-Pérez, J. de-Oliva-Rubio, J. H. Schmid, P. Cheben, Í. Molina-Fernández, and A. Ortega-Moñux. “An Ultracompact GRIN-Lens-Based Spot Size Converter Using Subwavelength Grating Metamaterials”. In: *Laser & Photonics Reviews* 13.11 (2019), p. 1900172. ISSN: 1863-8899. DOI: [10.1002/lpor.201900172](https://doi.org/10.1002/lpor.201900172).
- [Luque-González2020] J. M. Luque-González, A. Herrero-Bermello, A. Herrero-Bermello, A. Ortega-Moñux, M. Sánchez-Rodríguez, A. V. Velasco, J. H. Schmid, P. Cheben, Í. Molina-Fernández, Í. Molina-Fernández, R. Halir, and R. Halir. “Polarization Splitting Directional Coupler Using Tilted Subwavelength Gratings”. In: *Opt. Lett., OL* 45.13 (July 1, 2020), pp. 3398–3401. ISSN: 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.394696](https://doi.org/10.1364/OL.394696).
- [Luque-González2021a] J. M. Luque-González, A. Ortega-Moñux, R. Halir, J. H. Schmid, P. Cheben, Í. Molina-Fernández, and J. G. Wangüemert-Pérez. “Bricked Subwavelength Gratings: A Tailorable On-Chip Metamaterial Topology”. In: *Laser & Photonics Reviews* 15.6 (2021), p. 2000478. ISSN: 1863-8899. DOI: [10.1002/lpor.202000478](https://doi.org/10.1002/lpor.202000478).
- [Luque-González2021b] J. M. Luque-González, A. Sánchez-Postigo, A. Hadij-ElHouati, A. Ortega-Moñux, J. G. Wangüemert-Pérez, J. H. Schmid, P. Cheben, Í. Molina-Fernández, and R. Halir. “A Review of Silicon Subwavelength Gratings: Building Break-through Devices with Anisotropic Metamaterials”. In: *Nanophotonics* 10.11 (Aug. 26, 2021), pp. 2765–2797. ISSN: 2192-8614. DOI: [10.1515/nanoph-2021-0110](https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0110).
- [MACOM2021] MACOM. *MACOM Silicon Photonics (SiPh)*. 2021. URL: <https://www.macom.com/technologies/siph> (visited on 06/28/2021).



- [Madsen1998] C. Madsen, J. Wagener, T. Strasser, D. Muehlner, M. Milbrodt, E. Laskowski, and J. DeMarco. “Planar Waveguide Optical Spectrum Analyzer Using a UV-induced Grating”. In: *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* 4.6 (1998), pp. 925–929. ISSN: 1077260X. DOI: [10.1109/2944.736078](https://doi.org/10.1109/2944.736078).
- [Mandelstam2001] V. Mandelshtam. “FDM: The Filter Diagonalization Method for Data Processing in NMR Experiments”. In: *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy* 38.2 (Mar. 2001), pp. 159–196. ISSN: 00796565. DOI: [10.1016/S0079-6565\(00\)00032-7](https://doi.org/10.1016/S0079-6565(00)00032-7).
- [Mekis2011] A. Mekis, S. Gloeckner, G. Masini, A. Narasimha, T. Pinguet, S. Sahni, and P. De Dobbelaere. “A Grating-Coupler-Enabled CMOS Photonics Platform”. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 17.3 (May 2011), pp. 597–608. ISSN: 1558-4542. DOI: [10.1109/JSTQE.2010.2086049](https://doi.org/10.1109/JSTQE.2010.2086049).
- [Melati2019] D. Melati, P. G. Verly, A. Delâge, S. Wang, J. Lapointe, P. Cheben, J. H. Schmid, S. Janz, and D.-X. Xu. “Compact and Low Crosstalk Echelle Grating Demultiplexer on Silicon-On-Insulator Technology”. In: *Electronics* 8.6 (June 18, 2019), p. 687. ISSN: 2079-9292. DOI: [10.3390/electronics8060687](https://doi.org/10.3390/electronics8060687).
- [Melati2022] D. Melati, D. Melati, D.-X. Xu, R. Cheriton, S. Wang, M. Vachon, J. H. Schmid, P. Cheben, and S. Janz. “Athermal Echelle Grating and Tunable Echelle Grating Demultiplexers Using a Mach-Zehnder Interferometer Launch Structure”. In: *Opt. Express, OE* 30.9 (Apr. 25, 2022), pp. 14202–14217. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.453273](https://doi.org/10.1364/OE.453273).
- [Miller2018] R. Miller. *Cisco to Acquire Silicon Photonics Chip Maker Luxtera for \$660 Million*. TechCrunch. Dec. 18, 2018. URL: <https://social.techcrunch.com/2018/12/18/cisco-to-acquire-silicon-photonics-chip-maker-luxtera-for-660-million/> (visited on 07/15/2021).
- [Naghdi2018] B. Naghdi and L. R. Chen. “Silicon Photonic Four-Channel Optical Add-Drop Multiplexer Enabled by Subwavelength Grating Waveguides”. In: *IEEE Photonics J.* 10.4 (Aug. 2018), pp. 1–10. ISSN: 1943-0655, 1943-0647. DOI: [10.1109/JPHOT.2018.2857769](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2018.2857769).
- [Newsroom2019] N. Newsroom. *NVIDIA to Acquire Mellanox for \$6.9 Billion*. NVIDIA Newsroom Newsroom. Mar. 11, 2019. URL: <http://nvidianews.nvidia.com/news/nvidia-to-acquire-mellanox-for-6-9-billion> (visited on 07/15/2021).
- [Okamoto2014] K. Okamoto. “Wavelength-Division-Multiplexing Devices in Thin SOI: Advances and Prospects”. In: *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* 20.4 (July 2014), pp. 248–257. ISSN: 1077-260X, 1558-4542. DOI: [10.1109/JSTQE.2013.2291623](https://doi.org/10.1109/JSTQE.2013.2291623).
- [Pathak2013] S. Pathak, M. Vanslebrouck, P. Dumon, D. Van Thourhout, and W. Bogaerts. “Optimized Silicon AWG With Flattened Spectral Response Using an MMI Aperture”. In: *J. Lightwave Technol.* 31.1 (Jan. 2013), pp. 87–93. ISSN: 0733-8724, 1558-2213. DOI: [10.1109/JLT.2012.2231399](https://doi.org/10.1109/JLT.2012.2231399).
- [Pathak2014] S. Pathak, P. Dumon, D. Van Thourhout, and W. Bogaerts. “Comparison of AWGs and Echelle Gratings for Wavelength Division Multiplexing on Silicon-on-Insulator”. In: *IEEE Photonics J.* 6.5 (Oct. 2014), pp. 1–9. ISSN: 1943-0655. DOI: [10.1109/JPHOT.2014.2361658](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2014.2361658).
- [Pereira-Martín2021] D. Pereira-Martín, J. M. Luque-González, J. Gonzalo Wangüemert-Pérez, A. Hadij-ElHouati, Í. Molina-Fernández, P. Cheben, J. H. Schmid, S. Wang, W. N. Ye, J. Čtyroký, and A. Ortega-Moñux. “Complex Spectral Filters in Silicon Waveguides Based on Cladding-Modulated Bragg Gratings”. In: *Opt. Express* 29.11 (May 24, 2021), p. 15867. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.420696](https://doi.org/10.1364/OE.420696).

- [Pérez-Armenta2020] C. Pérez-Armenta, A. Ortega-Moñux, J. Čtyroký, P. Cheben, J. H. Schmid, R. Halir, Í. Molina-Fernández, and J. G. Wangüemert-Pérez. “Narrowband Bragg Filters Based on Subwavelength Grating Waveguides for Silicon Photonic Sensing”. In: *Opt. Express* 28.25 (Dec. 7, 2020), p. 37971. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.404364](https://doi.org/10.1364/OE.404364).
- [Poulton2017] C. V. Poulton, M. J. Byrd, M. Raval, Z. Su, N. Li, E. Timurdogan, D. Coolbaugh, D. Vermeulen, and M. R. Watts. “Large-Scale Silicon Nitride Nanophotonic Phased Arrays at Infrared and Visible Wavelengths”. In: *Opt. Lett.* 42.1 (Jan. 1, 2017), p. 21. ISSN: 0146-9592, 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.42.000021](https://doi.org/10.1364/OL.42.000021).
- [Rahim2018] A. Rahim, T. Spuesens, R. Baets, and W. Bogaerts. “Open-Access Silicon Photonics: Current Status and Emerging Initiatives”. In: *Proc. IEEE* 106.12 (Dec. 2018), pp. 2313–2330. ISSN: 0018-9219, 1558-2256. DOI: [10.1109/JPROC.2018.2878686](https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2878686).
- [Rakowski2020] M. Rakowski, C. Meagher, K. Nummy, A. Aboketaf, J. Ayala, Y. Bian, B. Harris, K. Mclean, K. McStay, A. Sahin, L. Medina, B. Peng, Z. Sowinski, A. Stricker, T. Houghton, C. Hedges, K. Giewont, A. Jacob, T. Letavic, D. Riggs, A. Yu, and J. Pellerin. “45nm CMOS — Silicon Photonics Monolithic Technology (45CLO) for Next-Generation, Low Power and High Speed Optical Interconnects”. In: *2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Mar. 2020, pp. 1–3.
- [Reed2010] G. T. Reed, G. Mashanovich, F. Y. Gardes, and D. J. Thomson. “Silicon Optical Modulators”. In: *Nature Photon* 4.8 (Aug. 2010), pp. 518–526. ISSN: 1749-4885, 1749-4893. DOI: [10.1038/nphoton.2010.179](https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.179).
- [Rickman2014] A. Rickman. “The Commercialization of Silicon Photonics”. In: *Nature Photon* 8.8 (Aug. 2014), pp. 579–582. ISSN: 1749-4885, 1749-4893. DOI: [10.1038/nphoton.2014.175](https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.175).
- [Ropp2021] C. Ropp, A. Yulaev, D. Westly, G. Simelgor, and V. Aksyuk. “Meta-Grating Outcouplers for Optimized Beam Shaping in the Visible”. In: *Opt. Express* 29.10 (May 10, 2021), p. 14789. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.424644](https://doi.org/10.1364/OE.424644).
- [Sacher2018] W. D. Sacher, J. C. Mikkelsen, Y. Huang, J. C. C. Mak, Z. Yong, X. Luo, Y. Li, P. Dumais, J. Jiang, D. Goodwill, E. Bernier, P. G.-Q. Lo, and J. K. S. Poon. “Monolithically Integrated Multilayer Silicon Nitride-on-Silicon Waveguide Platforms for 3-D Photonic Circuits and Devices”. In: *Proceedings of the IEEE* 106.12 (Dec. 2018), pp. 2232–2245. ISSN: 1558-2256. DOI: [10.1109/JPROC.2018.2860994](https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2860994).
- [Sánchez-Postigo2021a] A. Sánchez-Postigo, R. Halir, J. G. Wangüemert-Pérez, A. Ortega-Moñux, S. Wang, M. Vachon, J. H. Schmid, D.-X. Xu, P. Cheben, and Í. Molina-Fernández. “Breaking the Coupling Efficiency–Bandwidth Trade-Off in Surface Grating Couplers Using Zero-Order Radiation”. In: *Laser & Photonics Reviews* 15.6 (2021), p. 2000542. ISSN: 1863-8899. DOI: [10.1002/lpor.202000542](https://doi.org/10.1002/lpor.202000542).
- [Sánchez-Postigo2021b] A. Sánchez-Postigo, A. Ortega-Moñux, J. Soler Penadés, A. Osman, M. Nedeljkovic, Z. Qu, Y. Wu, Í. Molina-Fernández, P. Cheben, G. Z. Mashanovich, and J. G. Wangüemert-Pérez. “Suspended Germanium Waveguides with Subwavelength-Grating Metamaterial Cladding for the Mid-Infrared Band”. In: *Opt. Express* 29.11 (May 24, 2021), p. 16867. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.422764](https://doi.org/10.1364/OE.422764).
- [Schmid2007] J. H. Schmid, P. Cheben, S. Janz, J. Lapointe, E. Post, and D.-X. Xu. “Gradient-Index Antireflective Subwavelength Structures for Planar Waveguide Facets”. In: *Opt. Lett.* 32.13 (July 1, 2007), p. 1794. ISSN: 0146-9592, 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.32.001794](https://doi.org/10.1364/OL.32.001794).

- [Schmid2008] J. H. Schmid, P. Cheben, S. Janz, J. Lapointe, E. Post, A. Delâge, A. Densmore, B. Lamontagne, P. Waldron, and D.-X. Xu. “Subwavelength Grating Structures in Silicon-on-Insulator Waveguides”. In: *Advances in Optical Technologies* 2008 (July 13, 2008), pp. 1–8. ISSN: 1687-6393, 1687-6407. DOI: [10.1155/2008/685489](https://doi.org/10.1155/2008/685489).
- [Schmid2011] J. H. Schmid, P. Cheben, P. J. Bock, R. Halir, J. Lapointe, S. Janz, A. Delage, A. Densmore, J.-M. Fedeli, T. J. Hall, B. Lamontagne, R. Ma, I. Molina-Fernandez, and D.-X. Xu. “Refractive Index Engineering With Subwavelength Gratings in Silicon Microphotonic Waveguides”. In: *IEEE Photonics J.* 3.3 (June 2011), pp. 597–607. ISSN: 1943-0655. DOI: [10.1109/JPHOT.2011.2139198](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2011.2139198).
- [Shi2013] W. Shi, H. Yun, C. Lin, M. Greenberg, X. Wang, Y. Wang, S. T. Fard, J. Flueckiger, N. A. F. Jaeger, and L. Chrostowski. “Ultra-Compact, Flat-Top Demultiplexer Using Anti-Reflection Contra-Directional Couplers for CWDM Networks on Silicon”. In: *Opt. Express* 21.6 (Mar. 25, 2013), p. 6733. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.21.006733](https://doi.org/10.1364/OE.21.006733).
- [Shi2020a] W. Shi. *Nokia Acquires Elenion to Boost Optical Offering*. Telecoms.com. Feb. 19, 2020. URL: <https://telecoms.com/502542/nokia-acquires-elenion-to-boost-optical-offering/> (visited on 07/15/2021).
- [Shi2020b] W. Shi, Y. Tian, and A. Gervais. “Scaling Capacity of Fiber-Optic Transmission Systems via Silicon Photonics”. In: *Nanophotonics* 9.16 (Nov. 4, 2020), pp. 4629–4663. ISSN: 2192-8614, 2192-8606. DOI: [10.1515/nanoph-2020-0309](https://doi.org/10.1515/nanoph-2020-0309).
- [Siew2021] S. Y. Siew, B. Li, F. Gao, H. Y. Zheng, W. Zhang, P. Guo, S. W. Xie, A. Song, B. Dong, L. W. Luo, C. Li, X. Luo, and P. G.-Q. Lo. “Review of Silicon Photonics Technology and Platform Development”. In: *Journal of Lightwave Technology* (2021), pp. 1–1. ISSN: 1558-2213. DOI: [10.1109/JLT.2021.3066203](https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3066203).
- [Soref1986] R. Soref and J. Larenzo. “All-Silicon Active and Passive Guided-Wave Components for  $\lambda = 1.3$  and  $1.6$  Mm”. In: *IEEE J. Quantum Electron.* 22.6 (June 1986), pp. 873–879. ISSN: 0018-9197. DOI: [10.1109/JQE.1986.1073057](https://doi.org/10.1109/JQE.1986.1073057).
- [Stoll1978] H. M. Stoll. “Distributed Bragg Deflector: A Multifunctional Integrated Optical Device”. In: *Appl. Opt., AO* 17.16 (Aug. 15, 1978), pp. 2562–2569. ISSN: 2155-3165. DOI: [10.1364/AO.17.002562](https://doi.org/10.1364/AO.17.002562).
- [Sun2013] J. Sun, E. Timurdogan, A. Yaacobi, E. S. Hosseini, and M. R. Watts. “Large-Scale Nanophotonic Phased Array”. In: *Nature* 493.7431 (Jan. 2013), pp. 195–199. ISSN: 0028-0836, 1476-4687. DOI: [10.1038/nature11727](https://doi.org/10.1038/nature11727).
- [Sun2019] J. Sun, R. Kumar, M. Sakib, J. Driscoll, H. Jayatilleka, and H. Rong. “A 128 Gb/s PAM4 Silicon Microring Modulator With Integrated Thermo-Optic Resonance Tuning”. In: *Journal of Lightwave Technology* 37.1 (2019), pp. 110–115. ISSN: 0733-8724. DOI: [10.1109/JLT.2018.2878327](https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2878327).
- [Synopsys Inc2020] Synopsys Inc. *FullWAVE User Guide*. 2020. URL: <https://www.synopsys.com/photonic-solutions/rsoft-photonic-device-tools/passive-device-fullwave.html>.
- [Szelag2019] B. Szelag, K. Hassan, L. Adelmini, E. Ghegin, P. Rodriguez, F. Nemouchi, P. Brianceau, E. Vermande, A. Schembri, D. Carrara, P. Cavalié, F. Franchin, M.-C. Roure, L. Sanchez, C. Jany, and S. Olivier. “Hybrid III–V/Silicon Technology for Laser Integration on a 200-Mm Fully CMOS-Compatible Silicon Photonics Platform”. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 25.5 (Sept. 2019), pp. 1–10. ISSN: 1558-4542. DOI: [10.1109/JSTQE.2019.2904445](https://doi.org/10.1109/JSTQE.2019.2904445).

- [Taillaert2002] D. Taillaert, W. Bogaerts, P. Bienstman, T. Krauss, P. Van Daele, I. Moerman, S. Verstuyft, K. De Mesel, and R. Baets. “An Out-of-Plane Grating Coupler for Efficient Butt-Coupling between Compact Planar Waveguides and Single-Mode Fibers”. In: *IEEE Journal of Quantum Electronics* 38.7 (July 2002), pp. 949–955. ISSN: 1558-1713. DOI: [10.1109/JQE.2002.1017613](https://doi.org/10.1109/JQE.2002.1017613).
- [Taillaert2004] D. Taillaert, P. Bienstman, and R. Baets. “Compact Efficient Broadband Grating Coupler for Silicon-on-Insulator Waveguides”. In: *Opt. Lett.* 29.23 (Dec. 1, 2004), p. 2749. ISSN: 0146-9592, 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.29.002749](https://doi.org/10.1364/OL.29.002749).
- [Taillaert2006] D. Taillaert, F. Van Laere, M. Ayre, W. Bogaerts, D. Van Thourhout, P. Bienstman, and R. Baets. “Grating Couplers for Coupling between Optical Fibers and Nanophotonic Waveguides”. In: *Jpn. J. Appl. Phys.* 45 (8A Aug. 4, 2006), pp. 6071–6077. ISSN: 0021-4922, 1347-4065. DOI: [10.1143/JJAP.45.6071](https://doi.org/10.1143/JJAP.45.6071).
- [Thomson2016] D. Thomson, A. Zilkie, J. E. Bowers, T. Komljenovic, G. T. Reed, L. Vivien, D. Marris-Morini, E. Cassan, L. Viroth, J.-M. Fédéli, J.-M. Hartmann, J. H. Schmid, D.-X. Xu, F. Boeuf, P. O’Brien, G. Z. Mashanovich, and M. Nedeljkovic. “Roadmap on Silicon Photonics”. In: *J. Opt.* 18.7 (July 1, 2016), p. 073003. ISSN: 2040-8978, 2040-8986. DOI: [10.1088/2040-8978/18/7/073003](https://doi.org/10.1088/2040-8978/18/7/073003).
- [Tondini2017] S. Tondini, C. Castellan, M. Mancinelli, C. Kopp, and L. Pavesi. “Methods for Low Crosstalk and Wavelength Tunability in Arrayed-Waveguide Grating for On-Silicon Optical Network”. In: *J. Lightwave Technol.* 35.23 (Dec. 1, 2017), pp. 5134–5141. ISSN: 0733-8724, 1558-2213. DOI: [10.1109/JLT.2017.2768161](https://doi.org/10.1109/JLT.2017.2768161).
- [Tower Semiconductor2018] Tower Semiconductor. *Silicon Photonics (SiPho) - Tower Semiconductor*. July 1, 2018. URL: <https://towersemi.com/technology/rf-and-hpa/silicon-photonics-rf/> (visited on 03/29/2022).
- [Van Acoleyen2009] K. Van Acoleyen, W. Bogaerts, J. Jágerská, N. Le Thomas, R. Houdré, and R. Baets. “Off-Chip Beam Steering with a One-Dimensional Optical Phased Array on Silicon-on-Insulator”. In: *Opt. Lett.* 34.9 (May 1, 2009), p. 1477. ISSN: 0146-9592, 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.34.001477](https://doi.org/10.1364/OL.34.001477).
- [Van Acoleyen2011] K. Van Acoleyen, W. Bogaerts, and R. Baets. “Two-Dimensional Dispersive Off-Chip Beam Scanner Fabricated on Silicon-On-Insulator”. In: *IEEE Photon. Technol. Lett.* 23.17 (Sept. 2011), pp. 1270–1272. ISSN: 1041-1135, 1941-0174. DOI: [10.1109/LPT.2011.2159785](https://doi.org/10.1109/LPT.2011.2159785).
- [Velasco2012] A. V. Velasco, P. J. Bock, P. Cheben, M. L. Calvo, J. H. Schmid, J. Lapointe, D.-X. Xu, S. Janz, and A. Delâge. “Bandpass Filter Implemented with Blazed Waveguide Sidewall Gratings in Silicon-on-Insulator”. In: *Electronics Letters* 48.12 (June 7, 2012), pp. 715–717. ISSN: 1350-911X. DOI: [10.1049/el.2012.0591](https://doi.org/10.1049/el.2012.0591).
- [Vermeulen2018] D. Vermeulen and C. V. Poulton. “Optical Interfaces for Silicon Photonic Circuits”. In: *Proc. IEEE* 106.12 (Dec. 2018), pp. 2270–2280. ISSN: 0018-9219, 1558-2256. DOI: [10.1109/JPROC.2018.2865725](https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2865725).
- [Vivien2009] L. Vivien, J. Osmond, J.-M. Fédéli, D. Marris-Morini, P. Crozat, J.-F. Damlencourt, E. Cassan, Y. Lecunff, and S. Laval. “42 GHz p.i.n Germanium Photodetector Integrated in a Silicon-on-Insulator Waveguide”. In: *Optics Express* 17.8 (2009), pp. 6252–6257. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.17.006252](https://doi.org/10.1364/OE.17.006252).
- [Vivien2012] L. Vivien, A. Polzer, D. Marris-Morini, J. Osmond, J. Hartmann, P. Crozat, E. Cassan, C. Kopp, H. Zimmermann, and J. Fédéli. “Zero-Bias 40Gbit/s Germanium Waveguide Photodetector on Silicon”. In: *Optics Express* 20.2 (2012), pp. 1096–1101. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.20.001096](https://doi.org/10.1364/OE.20.001096).

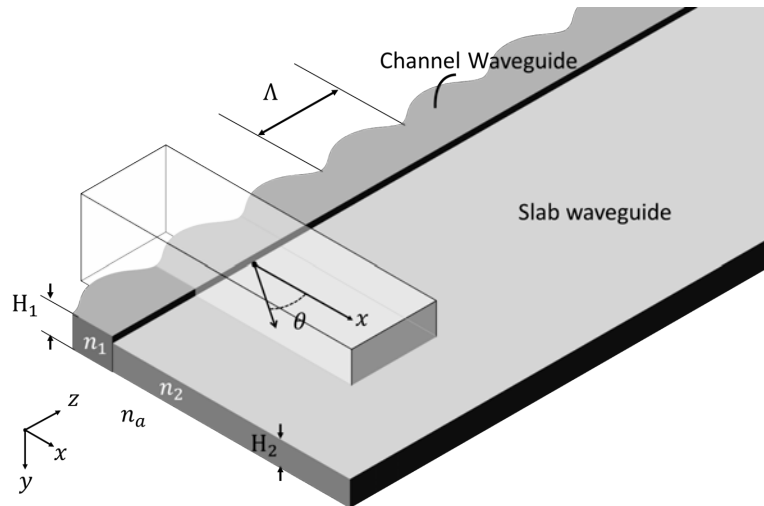
- [Wangüemert-Pérez2019] J. G. Wangüemert-Pérez, A. Hadij-ElHouati, A. Sánchez-Postigo, J. Leuermann, D.-X. Xu, P. Cheben, A. Ortega-Moñux, R. Halir, and Í. Molina-Fernández. “[INVITED] Subwavelength Structures for Silicon Photonics Biosensing”. In: *Optics & Laser Technology* 109 (Jan. 1, 2019), pp. 437–448. ISSN: 0030-3992. DOI: [10.1016/j.optlastec.2018.07.071](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.07.071).
- [Watanabe2017] T. Watanabe, M. Ayata, U. Koch, Y. Fedoryshyn, and J. Leuthold. “Perpendicular Grating Coupler Based on a Blazed Antireflection Structure”. In: *Journal of Lightwave Technology* 35.21 (Nov. 2017), pp. 4663–4669. ISSN: 07338724. DOI: [10.1109/JLT.2017.2755673](https://doi.org/10.1109/JLT.2017.2755673).
- [Witzens2018] J. Witzens. “High-Speed Silicon Photonics Modulators”. In: *Proceedings of the IEEE* 106.12 (Dec. 2018), pp. 2158–2182. ISSN: 1558-2256. DOI: [10.1109/JPROC.2018.2877636](https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2877636).
- [Wörhoff2015] K. Wörhoff, R. G. Heideman, A. Leinse, and M. Hoekman. “TriPleX: A Versatile Dielectric Photonic Platform”. In: *Advanced Optical Technologies* 4.2 (Apr. 1, 2015), pp. 189–207. ISSN: 2192-8584. DOI: [10.1515/aot-2015-0016](https://doi.org/10.1515/aot-2015-0016).
- [Yang2019] W. Yang, J. Chen, Y. Zhang, Y. Zhang, J.-H. He, and X. Fang. “Silicon-Compatible Photodetectors: Trends to Monolithically Integrate Photosensors with Chip Technology”. In: *Advanced Functional Materials* 29.18 (2019), p. 1808182. ISSN: 1616-3028. DOI: [10.1002/adfm.201808182](https://doi.org/10.1002/adfm.201808182).
- [Yole Développement2021] Yole Développement. *Silicon Photonics: Market and Technology Report 2021*. Yole Développement, 2021. URL: [https://www.i-micronews.com/products/silicon-photonics-2021/?utm\\_source=PR&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=PR\\_Silicon\\_Photonics\\_YOLEGROUP\\_May2021](https://www.i-micronews.com/products/silicon-photonics-2021/?utm_source=PR&utm_medium=email&utm_campaign=PR_Silicon_Photonics_YOLEGROUP_May2021) (visited on 06/04/2021).
- [Yun2019] H. Yun, M. Hammood, S. Lin, L. Chrostowski, and N. A. F. Jaeger. “Broadband Flat-Top SOI Add-Drop Filters Using Apodized Sub-Wavelength Grating Contradirectional Couplers”. In: *Opt. Lett.* 44.20 (Oct. 15, 2019), p. 4929. ISSN: 0146-9592, 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.44.004929](https://doi.org/10.1364/OL.44.004929).
- [Zhang2021] W. Zhang, K. Debnath, B. Chen, K. Li, S. Liu, M. Ebert, J. Dean Reynolds, A. Khokhar, C. Littlejohns, J. Byers, M. Husain, F. Gardes, S. Saito, and D. Thomson. “High Bandwidth Capacitance Efficient Silicon MOS Modulator”. In: *Journal of Lightwave Technology* 39.1 (2021), pp. 201–207. ISSN: 0733-8724. DOI: [10.1109/JLT.2020.3026945](https://doi.org/10.1109/JLT.2020.3026945).



## 2 Distributed Bragg deflectors

Distributed Bragg deflectors developed to date have prohibitively high insertion losses. In this chapter we aim to investigate the origin of these losses and develop solutions to overcome this limitation. We show that the main reason for the high losses in conventional Bragg deflector designs is the radiation loss out of the chip plane. A new design paradigm based on 'single beam condition' is proposed to solve this issue. The chapter is organized as follows. First, the deflector geometry and working principle are presented. Then, the relevant design parameters are described and the new tools developed for simulating this type of structures are introduced. Finally, conclusions are drawn.

### 2.1 Geometry and working principle



**Figure 2.1:** Geometry of a distributed Bragg deflector comprising a channel waveguide with a periodic perturbation and a lateral slab waveguide. The transparent box indicates a unitary cell of the periodic structure.

Figure 2.1 shows a typical geometry of a periodic deflector. The deflector comprises a channel waveguide with a periodic perturbation of period  $\Lambda$ , along with an adjacent slab waveguide. The channel waveguide, for the polarization and wavelength of interest (typically TE polarization and 1550 nm central wavelength), supports a single quasi-transverse mode, confined in the XY plane and propagating along z-direction. This indeed requires that the slab waveguide effective index is lower than the channel waveguide effective index. This can be achieved by using i) a slab material with a lower index than the core (i.e.  $n_2 < n_1$ ), ii) a slab height smaller than the waveguide height (i.e.  $H_2 < H_1$ ), iii) subwavelength grating metamaterials, or a combination of these three approaches. The light propagating through the channel waveguide is diffracted by the periodic grating at discrete directions  $\theta_m$  towards the slab waveguide, and is also scattered in a continuum of directions in the surrounding medium with refractive index  $n_a$ . This phenomenon is complex in nature and requires rigorous computational

methods for its quantitative study. In this work, Floquet-Bloch mode analysis is used extensively to obtain a quantitative description of the device operation.

Floquet-Bloch modes are the solutions of Maxwell's equations in periodic structures [Joannopoulos2008]. The Floquet-Bloch modes inherit the periodicity of the structure and reflect it in their modal field profile  $U(x,y,z)$  with the addition of a phase factor which accounts for the wave propagation:

$$U(x,y,z) = U(x,y,z - \Lambda)e^{-j\beta_{\text{FB}}\Lambda}, \quad (2.1)$$

where,  $\beta_{\text{FB}} = n_{\text{eff}}^{\text{FB}}k_0$  is the Floquet-Bloch mode phase constant, and  $z$ -periodic structure with period  $\Lambda$  is assumed.

Since Floquet-Bloch modes are periodic in space, they can be expressed as a superposition of Fourier spatial harmonics:

$$U(x,y,z) = \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} u_m(x,y)e^{-j(\beta_{\text{FB}}+m\frac{2\pi}{\Lambda})z}, \quad (2.2)$$

where  $u_m(x,y)$  is the transversal profile of  $m$ -th harmonic propagating in the  $z$  direction with a phase constant given by:

$$k_m^{\text{FB}} = k_0n_{\text{eff}}^{\text{FB}} + m\frac{2\pi}{\Lambda}. \quad (2.3)$$

On the other hand, the slab waveguide provides confinement in vertical (Y) direction while it supports an infinite continuum of modes propagating in different directions ( $\theta$ ) in XZ plane with effective index  $n_s$  and a wave-vector  $\vec{k}_s$  given by:

$$\vec{k}_s = n_s k_0 (\cos(\theta)\hat{\mathbf{a}}_x + \sin(\theta)\hat{\mathbf{a}}_z), \quad (2.4)$$

where  $\hat{\mathbf{a}}_x$  and  $\hat{\mathbf{a}}_z$  are the unitary vectors in  $x$  and  $z$  directions, respectively. This corresponds to the equation of a circumference, as illustrated in the momentum diagram of Fig. 2.2.

The channel waveguide mode and the slab modes can be coupled together, resulting in a power transfer between the two, providing the phase-matching condition is fulfilled between some of the harmonics of the Floquet-Bloch mode and the slab modes propagating at directions  $\theta_m$  within the slab, according to grating equation [Tamir1977]:

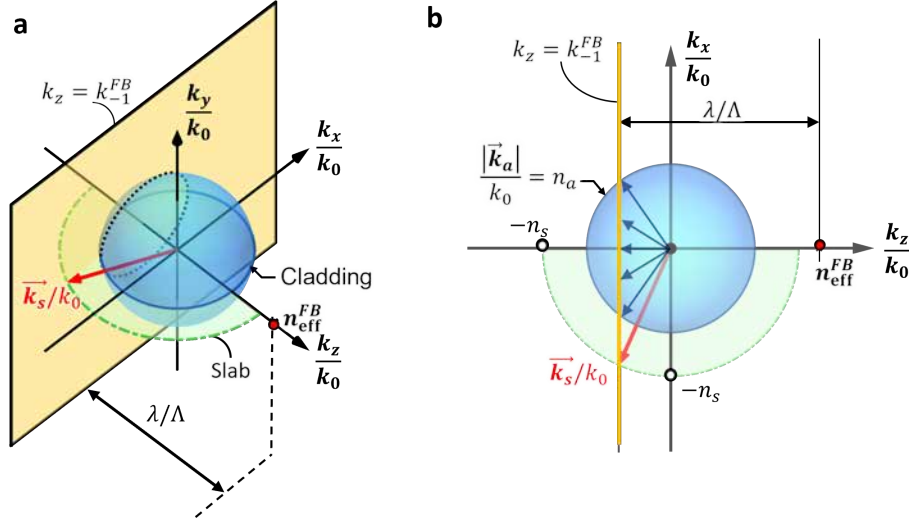
$$k_m^{\text{FB}} = \vec{k}_s \cdot \hat{\mathbf{a}}_z \rightarrow \quad (2.5)$$

$$n_{\text{eff}}^{\text{FB}} + m\frac{\lambda}{\Lambda} = n_s \sin(\theta_m), \quad (2.6)$$

. Maximum power transfer efficiency is achieved when only one order (harmonic with  $m = -1$ ) is allowed to couple to the slab. That is, the harmonic  $m = -1$  should fulfil the phase matching condition (2.6), i.e.  $-n_s < n_{\text{eff}}^{\text{FB}} - \lambda/\Lambda$ , while forbidding it for the harmonic with  $m = -2$ , and hence any harmonic with  $m < -1$ , i.e.  $n_{\text{eff}}^{\text{FB}} - 2\lambda/\Lambda < -n_s$ . These two criteria can be written as a condition on the wavelength-to-pitch ratio:

$$\frac{n_{\text{eff}}^{\text{FB}} + n_s}{2} < \frac{\lambda}{\Lambda} < n_{\text{eff}}^{\text{FB}} + n_s. \quad (2.7)$$





**Figure 2.2:** K-diagram for a coupling with the lateral slab and the surrounding medium with a refractive index  $n_a$ . a) 3D view, b) projection in XZ plane. The red arrows indicate the wave-vector of the mode propagating within the slab. The wave-vectors of the waves fulfilling the phase-matching condition in the surrounding medium describe a circumference on the blue sphere indicated by a dashed curve in a). A subset of those wave-vectors are indicated in b) with blue arrows.

In the following analysis we assume this condition is met and only the -1st order is allowed. In general, the power scattered by the waveguide grating does not couple exclusively to the slab but also to the surrounding medium (refractive index  $n_a$ ). The continuum of waves in the surrounding medium have wave-vectors  $\vec{k}_a$  that describe a spherical surface of radius  $|\vec{k}_a| = k_0 n_a$ , as shown in blue in Fig. 2.2. From this continuum, only those waves that fulfil the phase-matching condition are excited:

$$n_{\text{eff}}^{\text{FB}} + m \frac{\lambda}{\Lambda} = \frac{\vec{k}_a \cdot \hat{a}_z}{k_0}. \quad (2.8)$$

The phase-matching conditions (2.6) and (2.8) can be represented geometrically in the wave-vector space (k-space) as shown in Fig. 2.2. The phase-matching conditions of the -1st harmonic with the slab modes and the surrounding medium correspond to the intersection of the plane  $k_z = k_{-1}^{\text{FB}}$  with the circumference containing the allowed wave-vectors within the slab (green circle in Fig. 2.2) and the sphere surface of the allowed wave-vectors in the surrounding medium  $n_a$  (blue sphere in Fig. 2.2). This diagram is useful for gaining a more intuitive understanding of the underlying physics through a simple geometric representation.

As a consequence of power transfer from the waveguide grating mode to the slab and the surrounding medium, the Floquet-Bloch mode propagating in the channel waveguide is lossy and decays exponentially along the propagation direction. Equation (2.2) can be modified to account for this decay:

$$U(x, y, z) = \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} u_m(x, y) e^{-j(\beta_{\text{FB}} + m \frac{2\pi}{\Lambda})z} e^{-\alpha z}, \quad (2.9)$$

where  $\alpha$  is grating strength (leakage factor) which measures the fraction of power trans-

mitted by the grating waveguide  $P_{\text{tx}}(z)$  that is radiated per unit length  $p_{\text{rad}}$  [Tamir1977]:

$$\alpha = \frac{p_{\text{rad}}(z)}{2P_{\text{tx}}(z)} = -\frac{1}{2P_{\text{tx}}(z)} \cdot \frac{\partial}{\partial z} P_{\text{tx}}(z). \quad (2.10)$$

Quite often we are interested only in the power carried by a certain diffraction order  $m$  to the medium  $M$ , e.g. slab. Thus, it is useful to define a partial grating strength given by [Tamir1977]:

$$\alpha_m^M = \frac{p_{\text{rad},m}^M(z)}{2P_{\text{tx}}(z)}, \quad (2.11)$$

where  $p_{\text{rad},m}^M$  is the power radiated per unit length by the  $m$ -th harmonic to the medium  $M$ . We can also define a corresponding diffraction efficiency:

$$\eta_m^M = \frac{p_{\text{rad},m}^M(z)}{p_{\text{rad}}(z)} = \frac{\alpha_m^M}{\alpha}, \quad (2.12)$$

which defines the fraction of diffracted power that is coupled to the  $m$ -th harmonic in the medium  $M$ . Here, we are primarily interested in the power coupled to slab via the -1st order, and the corresponding efficiency  $\eta_{-1}^{\text{slab}}$ , so in the following we will refer to this efficiency as  $\eta$ .

## 2.2 System analysis and design tools

As discussed in the previous section, Floquet-Bloch mode analysis is a rigorous method for analyzing periodic structures. By computing the Floquet-Bloch modes we can obtain the field profile within a single period as well as the mode complex effective index  $n_{\text{eff}}^{\text{FB}}$ . The effective index determines the phase constant  $\beta_{\text{FB}} = \text{Re}(n_{\text{eff}}^{\text{FB}})k_0$  and the grating strength  $\alpha = -\text{Im}(n_{\text{eff}}^{\text{FB}})k_0$ , while the calculated field allows determination of diffraction efficiency  $\eta_m^M$ .

### 2.2.1 System parameters and design procedure for uniform deflectors

From the calculated Floquet-Bloch mode we can obtain the system parameters describing the deflector operation:

**Diffraction efficiency  $\eta$ .** Diffraction efficiency to the -1st order is computed by using a combination of power monitors and Fourier analysis of the modal field profile. The power flux is computed within a box containing the unit cell as shown in Fig. 2.1. The total flux through the four facets considered is the total radiated power  $P_{\text{rad}}$ . We are interested in the power fraction radiated to the slab waveguide, i.e. the power radiated from the box through lower  $x$  frontier  $P_{x-}$ . Hence, the radiated power fraction coupled to the slab is  $P_{x-}/P_{\text{rad}}$ . The power fraction radiated into the slab might be carried by several harmonics. The power fraction

carried by each harmonic can be computed using the Fourier series  $a_m$  of the modal field at the middle of the slab ( $y = 0$ ) at a position  $x$  outside the channel waveguide:

$$a_m = \int_{-\infty}^{+\infty} U_{slab}(z) \exp(j\beta_{FB}z + \alpha z) \exp\left(-j\frac{2\pi}{\Lambda}mz\right) dz. \quad (2.13)$$

From the above equation we obtain the power fraction carried by harmonic  $m$  in the slab as  $|a_m|^2 / \sum |a_k|^2$ . Thus the efficiency to the -1st order in the slab is:

$$\eta = \eta_{-1}^{slab} = \frac{P_{x^-} |a_{-1}|^2}{P_{rad} \sum |a_k|^2}. \quad (2.14)$$

**Power transmitted  $P_{tx}$ :** The residual power at the end of the grating is:

$$P_{tx} = e^{-2\alpha L}, \quad (2.15)$$

where  $\alpha$  is the grating radiation strength and  $L$  is the grating length.

**Power coupled to the slab  $P_{slab}$ :** The power coupled to the given order in the slab is computed from the diffraction efficiency and grating strength as

$$P_{slab} = 1 - P_{tx} = \eta \left(1 - e^{-2\alpha L}\right). \quad (2.16)$$

**Diffacted field amplitude profile  $|r(z)|$ :** The diffracted field for a periodic grating follows an exponential profile with the same decay factor as the grating mode

$$|r(z)| \propto e^{-\alpha z}. \quad (2.17)$$

**Diffacted field phase profile  $\varphi(z) = \angle r(z)$ :** For a uniform periodic grating, the phase variation is linear and given by the Floquet-Bloch mode effective index, the grating period and order number  $m$ . Assuming -1st order mode propagation, the phase profile is

$$\varphi(z) = \angle r(z) = \varphi_0 - \left(\beta_{FB} - \frac{2\pi}{\Lambda}\right) z. \quad (2.18)$$

For uniform (non-apodized) deflectors the design procedure is straightforward, using equations (2.17) and (2.18) : the diffractive element is designed to have the required grating strength  $\alpha$  to obtain the target field amplitude while the grating pitch needs to be adjusted (chirped) to obtain the required linear phase within the slab. Finally, the power fraction coupled to the slab is controlled using relation (2.16).

### 2.2.2 FDTD-based Floquet-Bloch analysis

**FDTD** is a commonly used electromagnetic computational method as it can solve Maxwell's equations directly without any assumption about the sources or the materials [Taflove2005]. **FDTD** simulators have become the gold standard for designing integrated photonic devices. However, 3D **FDTD** is computationally intensive and

often not suitable for designing large structures, especially when an extensive multi-dimensional design space is considered. For the design of larger scale devices, less computationally intensive mode analysis techniques are preferred.

For designing periodic structures Floquet-Bloch mode analysis is particularly suitable. FDTD simulators can be used to efficiently compute Floquet-Bloch modes of periodic structures, if equipped with periodic boundary condition (PBC) supporting an arbitrary phase shift between the periodically linked domain edges. PBCs enable the simulation of an infinite periodic system by computing the fields in a single period (cell). When a PBC is applied along a given dimension,  $z$  for instance, any field leaving the simulation domain at one side re-enters from the opposite side multiplied by a phase factor, which can be mathematically expressed as:

$$\vec{\mathbf{E}}(z_{\max}) = \vec{\mathbf{E}}(z_{\min})e^{-jk_z\Lambda}, \quad (2.19)$$

where  $z_{\min}$  and  $z_{\max}$  are the boundary coordinates of the simulation domain along the  $z$  axis,  $\Lambda = z_{\max} - z_{\min}$  is the simulation domain length which equals the pitch of the periodic structure in  $z$  direction, and  $k_z$  is the Floquet-Bloch phase constant along the same direction.

A periodic boundary condition effectively creates a resonator supporting various resonant modes that are closely related to the Floquet-Bloch modes of the periodic structure. The resonant modes are characterized by their field profile and resonant frequency. To solve for these modes using an FDTD simulator, a Gaussian-shaped source that is band-limited around the targeted wavelength is introduced to the simulation domain, and then the simulation is left running freely after the sources have turned off for sufficient time<sup>1</sup>. The modes that fulfil the phase condition imposed by the PBC will remain while the rest will vanish due to destructive interference. The resonant frequencies are determined by examining the peaks of the Fourier transform of any of the six field components (preferably the principal component for the mode of interest) at an arbitrary position where the mode of interest does not have a node. This way, one can find the frequencies of the resonant modes, i.e. Floquet-Bloch modes with the imposed phase constant  $k_z$ . While this method works well for lossless modes, it is not appropriate for lossy (leaky) modes. For the latter, not only the resonance frequencies need to be found but also their resonance width which determines the resonance time decay rate  $\rho$  and the corresponding Floquet-Bloch mode propagation loss  $\alpha$  (i.e. grating strength). In this case, it is convenient to decompose the field in a superposition of dampened sinusoids, i.e.  $\sum a_n \exp(-j(\omega_n t - \phi) - \rho_n t)$ . This allows the resonant frequencies  $\omega_n$  and the time decay factors  $\rho_n$  to be calculated simultaneously.

The time decay factor  $\rho$  of the resonant mode is related to the propagation leakage  $\alpha$  of the Floquet-Bloch and the group velocity  $v_g$  [Taflove2005, Chap. 16]:

$$\alpha = \frac{\rho}{v_g}. \quad (2.20)$$

---

<sup>1</sup>The simulation time is a critical parameter for an accurate determination of resonant frequencies and their corresponding decay factors. Here, we used 150 time periods of the excitation signal. For a detailed discussion on the selection of the simulation time we refer the reader to section 16.11.3 of [Taflove2005]

The general problem of decomposing a signal in a sum of damped sinusoids is ill-conditioned and general function fitting algorithms typically struggle with this task. However, for some special cases, this decomposition problem can be solved efficiently using the **filter diagonalization method (FDM)** algorithm which transforms the original problem into a matrix diagonalization problem, for which there exist efficient algorithms, particularly when few eigenvalues (frequencies) are involved [Neuhauser1990; Wall1995; Mandelshtam2001]. Furthermore, the **FDM** algorithm outperforms the Fourier transform in resolution as it circumvents the Heisenberg uncertainty principle [Mandelshtam2001] and the simulation time is reduced up to 8 times compared to the Fourier transform for the same spectral resolution.

In this work, the commercial **FDTD** simulator FullWave [Synopsys Inc2020] was used in combination with the **FDM** implementation by Damião [Damião2015] to implement an iterative Floquet-Bloch mode solver for MATLAB [Mathworks Inc2017]. The tool first configures properly the **FDTD** simulator in terms of **PBC** and the source. The source used is a Gaussian beam with the size similar to the targeted Floquet-Bloch mode. The temporal variation of the source is band-limited near the wavelength of interest, using a Gaussian-modulated sinusoidal carrier. The carrier frequency is selected to match the free-space wavelength of interest. The simulation is then run for sufficient time, the fields temporal variation after the source turns off is analysed via the **FDM** algorithm to extract the resonances, and the Floquet-Bloch mode profiles and frequencies associated with a given wavenumber are obtained. This procedure is combined with the secant root-finding method [Allen2019] to find the Floquet-Bloch phase constant that needs to be imposed in the **PBC** to obtain a resonance sufficiently close to the wavelength (frequency) of interest. As a by product of this iterative algorithm, the group velocity is derived via a finite difference relation. Therefore, not only the Floquet-Bloch wavenumber but also mode propagation loss can be determined using equation (2.20).

### 2.2.3 Apodization

For practical applications, the exponential field profile with a linear phase generated by a uniform deflector is often not optimal and an arbitrarily beam profile (intensity and phase) is preferred. An arbitrary diffracted field can be synthesized by varying the deflector geometry, i.e. apodizing the grating. This adds another degree of complexity for the deflector design because instead of one period, hundreds of different diffractive elements must be designed. Since the grating is no longer periodic, it appears that to design the deflector one would need full 3D **FDTD** simulations of the complete structure, which could require prohibitive computational resources. However, an efficient approach based on Floquet-Bloch mode analysis can be used if the geometry varies slowly enough (adiabatically) along the grating and the energy is carried primarily by the fundamental Floquet-Bloch mode. For such adiabatic structures, the calculation of the fundamental Floquet-Bloch mode of the diffractive elements is sufficient for complete device design. The diffracted beam amplitude, phase and power can be readily obtained from the local Floquet-Bloch mode analysis of individual elements.

### 2.2.3.1 System parameters for apodized deflectors

For an apodized grating, the system parameters presented in subsection 2.2.1 now take the form of integral functions, along the position on the grating  $z$ :

**Power transmitted:** The power transmitted by the waveguide grating at position  $z$  can be computed by integrating the radiation strength up to that position:

$$P_{\text{tx}}(z) = e^{-2 \int_0^z \alpha(\zeta) d\zeta}. \quad (2.21)$$

**Power coupled to the desired order in the slab:** The power diffracted per unit length towards the slab in the -1st harmonic at position  $z$  can be expressed using (2.21) and (2.12) as:

$$p_{\text{slab}}(z) = 2\eta(z)\alpha(z)P_{\text{tx}}(z) = 2\eta(z)\alpha(z)e^{-2 \int_0^z \alpha(\zeta) d\zeta}. \quad (2.22)$$

By integrating this expression along the whole deflector length  $L$  we obtain the total power coupled to the slab:

$$P_{\text{slab}} = \int_0^L p_{\text{slab}}(z) dz. \quad (2.23)$$

**Diffracted field amplitude profile  $|r(z)|$ :** The amplitude of the field  $r(z)$  is proportional to the square root of the power diffracted per unit length  $p_{\text{slab}}(z)$ . Thus, by taking the square root of expression (2.22) we obtain:

$$|r(z)| \propto \sqrt{\eta(z)\alpha(z)} e^{-\int_0^z \alpha(\zeta) d\zeta}. \quad (2.24)$$

**Diffracted field phase profile  $\varphi(z) = \angle r(z)$ :** The phase  $\varphi(z)$  of the wave diffracted by the -1st harmonic towards the slab is defined by the Floquet-Bloch mode phase constant  $\beta_{\text{FB}}(z)$  and diffractive elements pitch  $\Lambda(z)$  along the deflector

$$\varphi(z) = \angle r(z) = \varphi(0) - \int_0^z \left( \beta_{\text{FB}}(\zeta) - \frac{2\pi}{\Lambda(\zeta)} \right) d\zeta. \quad (2.25)$$

### 2.2.3.2 Design of apodized deflectors

The design procedure for apodized deflectors indeed is more complex than for uniform periodic gratings. However, the adiabaticity condition can be leveraged to develop a simple and efficient design procedure for apodized deflectors that yields very accurate results. The procedure developed in this Thesis is outlined below:

1. Select the input power fraction that will be radiated by the deflector  $C_{\text{rad}}$ . In most cases it is desired to radiate all the input power (i.e.  $C_{\text{rad}} = 1$ ), nevertheless this is not feasible for practical deflectors with finite length and radiation strength. For this reason,  $C_{\text{rad}}$  is chosen higher than 0.95 to obtain practical designs with low excess losses ( $< 0.22$  dB).

2. Design the grating strength  $\alpha(z)$  variation for the targeted profile  $r(z)$ . This can be readily done by using equation (2.17) and assuming that  $\eta(z)$  is constant along the grating, in which case it is obtained:

$$\alpha(z) = \frac{1}{2} \frac{|r|^2(z)}{C_{rad}^{-1} - \int_0^z |r|^2(\zeta) d\zeta}. \quad (2.26)$$

where  $L$  is the deflector length and  $r(z)$  is normalized such that  $\int_0^L |r|^2(z) dz = 1$ .

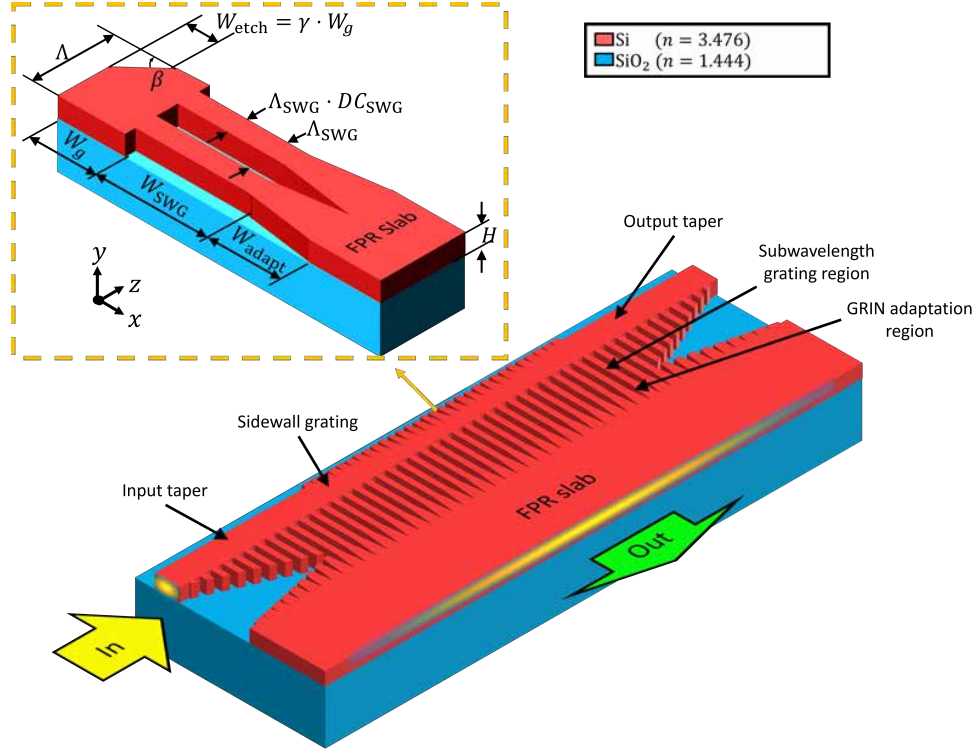
3. Design an optimized set of deflector diffractive elements that synthesizes radiation strengths within the range determined in the previous step. For this task we used efficient Floquet-Bloch analysis as described in subsection 2.2.2. We aimed for geometries that had maximum efficiency  $\eta$  while maintaining constant real part of the effective index. In this step the period is set to  $\Lambda_0$  so that all elements radiate near the target direction.
4. From the previously designed set of diffractive elements, select those that synthesize the required grating strength at each position along the deflector. As a result, the deflector geometry which synthesizes the desired beam amplitude profile is obtained.
5. Finally, the deflector period is adjusted (chirped) along the grating to obtain the required phase variation:

$$\Lambda(z) = \frac{\lambda_0}{\text{Re}(n_{\text{eff}}^{\text{FB}}(z)) + \frac{\partial \varphi(z)}{\partial z} k_0^{-1}}, \quad (2.27)$$

As a rule of thumb, the applied period adjustment should not exceed 5% to limit changes in the grating strength which could affect the amplitude profile.

### 2.3 Complete design of an apodized DBD

In this section, we will outline the design of the DBD reported in [Hadij-ElHouati2019]. For a detailed explanation, we refer the reader to the original paper included in section A.1.



**Figure 2.3:** Sidewall-grating based distributed Bragg deflector that converts a conventional silicon wire mode (In) to a vertically confined Gaussian beam that propagates in the chip plane (Out). Light is diffracted sidewise from the Si-wire waveguide with a blazed sidewall grating and couples into the slab free propagation region (FPR). The subwavelength grating facilitates efficient coupling between the grating waveguide and the FPR slab while minimizing lateral leakage of the waveguide mode. A detailed diagram of the diffractive element is also shown. The upper cladding is not shown for clarity.

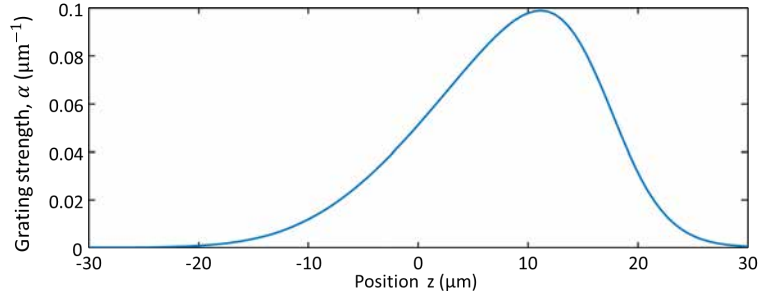
Following the design procedure outlined above, we have designed a DBD beam expander for the SOI platform that generates a collimated Gaussian beam of  $30\ \mu\text{m}$  of mode field diameter (MFD), when transversal electric (TE) mode is injected in the input waveguide. Figure 2.3 shows the device geometry comprising an apodized deflector, and adiabatic input and output tapers that gradually connect with the lateral metamaterial slab. The lateral slab region was implemented with an SWG metamaterial transitioned to a solid silicon slab through a graded index (GRIN) region of a length  $W_{\text{adapt}}$ .

We computed the required grating strength to generate a Gaussian with a beam size of  $\text{MFD} = 30\ \mu\text{m}$ . By applying expression (2.26) with a condition that 98% ( $-0.09\ \text{dB}$ ) of the input power is radiated by the deflector, we obtained the required grating strength profile as shown in Fig. 2.4. It is observed that radiation strengths ranging from  $0\ \mu\text{m}^{-1}$  to  $0.1\ \mu\text{m}^{-1}$  are required.

A library of diffractive elements was built that synthesizes grating strengths in the required range with optimized -1st order diffraction efficiency  $\eta$ . For this purpose, we



### 2.3. Complete design of an apodized DBD

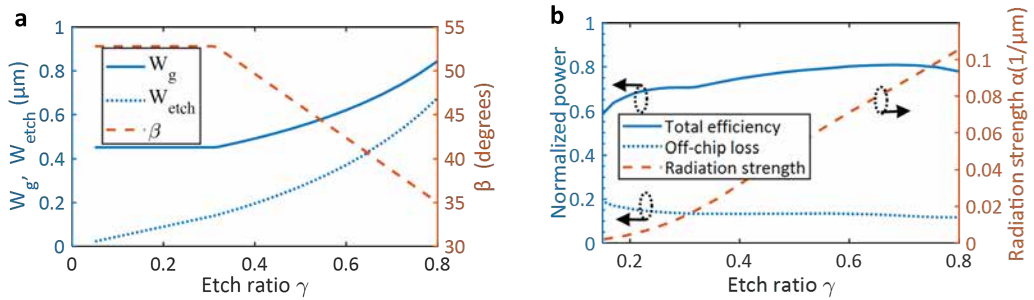


**Figure 2.4:** Grating strength variation along the deflector required to produce a Gaussian beam of MFD = 30  $\mu\text{m}$  carrying 98% of the input power.

designed independently the *SWG* region parameters ( $\Lambda_{\text{SWG}}$ ,  $\text{DC}_{\text{SWG}}$ ,  $W_{\text{SWG}}$ ), which were maintained unaltered for all elements. The geometrical parameters ( $W_g$ ,  $\gamma$ ,  $\beta$ ) of diffractive elements were designed to obtain the specific diffraction strength while maintaining high efficiency.

The *SWG* region was designed with a duty cycle  $\text{DC}_{\text{SWG}} = 0.5$  and pitch  $\Lambda_{\text{SWG}} = \Lambda/2$  to maximize the minimum feature size (MFS), ensuring subwavelength regime and permitting a convenient Floquet-Bloch analysis by allowing the period of the diffractive grating comprise an integer number of *SWG* periods. Since the *FPR* slab has an effective index higher than the Floquet-Bloch mode, there is a direct leakage from the waveguide to the *FPR* slab (0th order diffraction). We minimize the lateral leakage by setting the *SWG* region a wide enough,  $W_{\text{SWG}} = 2 \mu\text{m}$ . The *GRIN* region length  $W_{\text{Adapt}}$  was set to 1.5  $\mu\text{m}$  for an adiabatic transition from *SWG* to silicon slab.

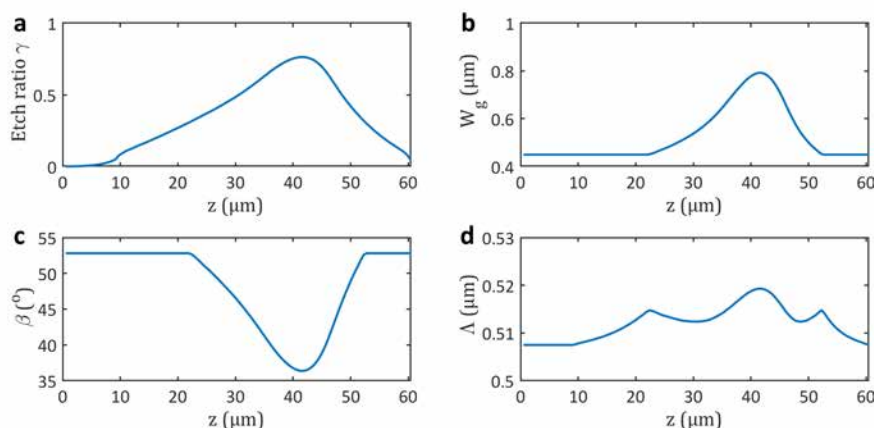
For the sidewall grating, the period  $\Lambda$  is set to 551 nm so that only the -1st diffraction order couple to the lateral *SWG* slab at a near-normal direction ( $\theta \approx -5^\circ$ ). The diffractive grating parameters were varied within the following ranges defining our design space:  $\gamma \in [0.2, 0.8]$ ,  $W_g \in [450 \text{ nm}, 750 \text{ nm}]$  and  $\beta \in [20^\circ, 70^\circ]$ . Preliminary analysis of the simulation results yielded two main conclusions: i) the grating strength is primarily governed by the etch ratio  $\gamma$  and ii) the efficiency is controlled by the blazing angle  $\beta$  and waveguide width  $W_g$ . The efficiency  $\eta(\gamma, \beta, W_g)$  was computed within the design space from the Floquet-Bloch modal fields. Next, for each etch ratio  $\gamma$ , the optimal  $W_g$  and  $\beta$  that maximize the efficiency were determined. For the weakest elements ( $\gamma < 0.3$ ), the width  $W_g$  was maintained constant at 450 nm and the etch ratio  $\gamma$  was reduced as needed.



**Figure 2.5:** a) Geometric parameters of the optimized sidewall blazed grating versus the etch ratio  $\gamma$ . b) Grating strength, diffraction efficiency and loss due to off-chip radiation.

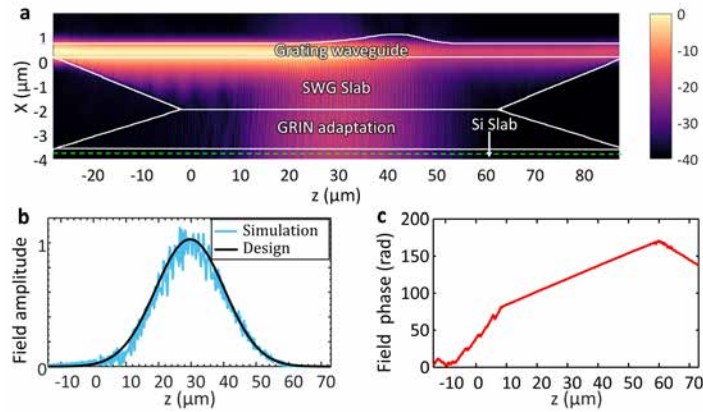
The resulting diffractive elements parameters are shown in Fig. 2.5(a). The corresponding radiation strength, efficiency and off-chip loss are shown in Fig. 2.5(b). Diffractive elements that produce radiation strengths in the range  $[0.002, 0.1] \mu\text{m}^{-1}$  have been designed by varying the etch depth ratio from 0.05 to 0.8 with efficiencies that range from 60% to 80%. The figure also includes the losses due to off-chip radiation ( $P_{\text{Off-chip}}/P_{\text{rad}}$ ) which accounts for most of the loss.

The diffractive elements were selected from the optimal set designed to implement the grating strengths shown in Fig. 2.4. Then, expression (2.27) was used to calculate the pitch variation required to impose a collimated phase at an angle of  $\theta_0 = -8.4^\circ$ , i.e.  $\partial\varphi/\partial z = -k_0 n_s \sin \theta_0$ . The calculated grating parameters along the deflector structure ( $z$ -axis) are shown in Fig. 2.6. The SWG slab period was varied accordingly so that it is always half of the grating period shown in Fig. 2.6(d). These parameter variations were used as is, without any approximation, in the following steps.



**Figure 2.6:** Diffractive elements parameters along the distributed Bragg deflector, targeting  $30 \mu\text{m}$  MFD Gaussian beam in the slab. a) Etch ratio, b) waveguide width, c) blazing angle and d) pitch variation as function of the position along the deflector.

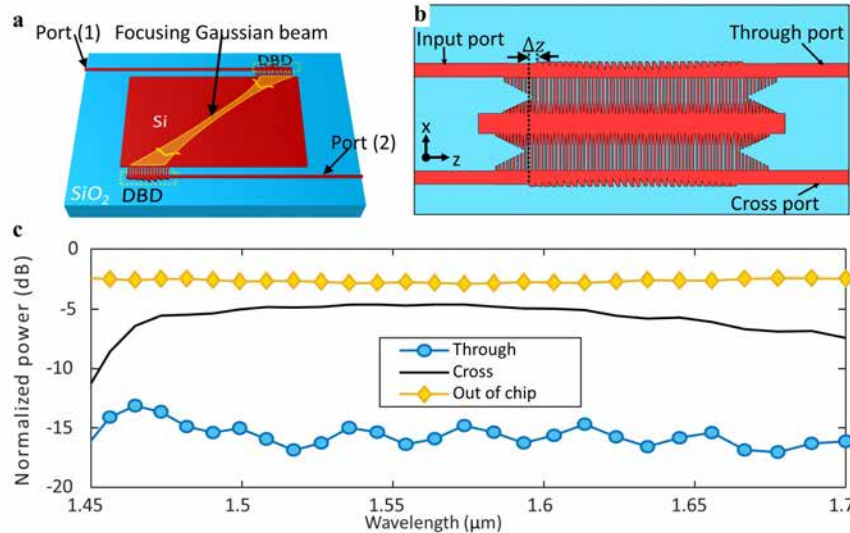
The full device was analysed using 3D FDTD simulations. The magnetic field magnitude in XZ plane (in the middle of the silicon layer) is shown in Fig. 2.7(a). It is observed that the power entering from the silicon wire (input on the left) is mainly radiated along the  $x$ -direction as a Gaussian beam that propagates in the FPR slab. Figures 2.7(b) and 2.7(c) show the magnetic field profile amplitude (b) and phase (c) along the green dashed line plotted in Fig. 2.7(a). It is observed that the radiated field shape is in good agreement with the target field and its phase is perfectly linear. This is also corroborated by the high overlap integral of  $-0.18 \text{ dB}$  with the target beam. The total insertion loss of the device, which is defined as the input power fraction transferred to the Gaussian beam, is  $2.15 \text{ dB}$  (61%), of which  $1.87 \text{ dB}$  corresponds to out-of-plane radiation loss,  $0.18 \text{ dB}$  to the field mismatch and  $0.1 \text{ dB}$  is due to residual transmitted power.



**Figure 2.7:** a) Principal magnetic field component amplitude  $|H_y|$  in the XZ plane at the middle of the Si slab. b) The magnetic field magnitude  $H_y$  along the green dashed line in a). c) The magnetic field phase  $H_y$  along the green dashed line in a).

### 2.3.1 Free-space link emulation: back-to-back DBD structure

DBDs can enable wireless on-chip communications in the SOI platform. For this purpose, two identical DBDs designed to generate a focusing beam are placed apart and connected by a slab. One DBD acts as a transmitting antenna, while the other deflector, which is identical but flipped back, acts as a receiving antenna. This configuration is illustrated in Fig. 2.8(a). Figure 2.8(b) shows a simplified structure that is small enough to permit 3D FDTD simulation to assess the viability of the concept. In this configuration, two identical DBDs have been arranged in a back-to-back configuration. One of the deflectors has been rotated  $180^\circ$  and a small offset  $\Delta z$  has been included to compensate for the displacement due to radiation angle  $\theta$ .



**Figure 2.8:** a) An on-chip free-space link based on two DBDs. b) The back-to-back DBD structure. c) The power at the through and cross ports and the power radiated out of the chip (normalized to the input power) as a function of the wavelength.

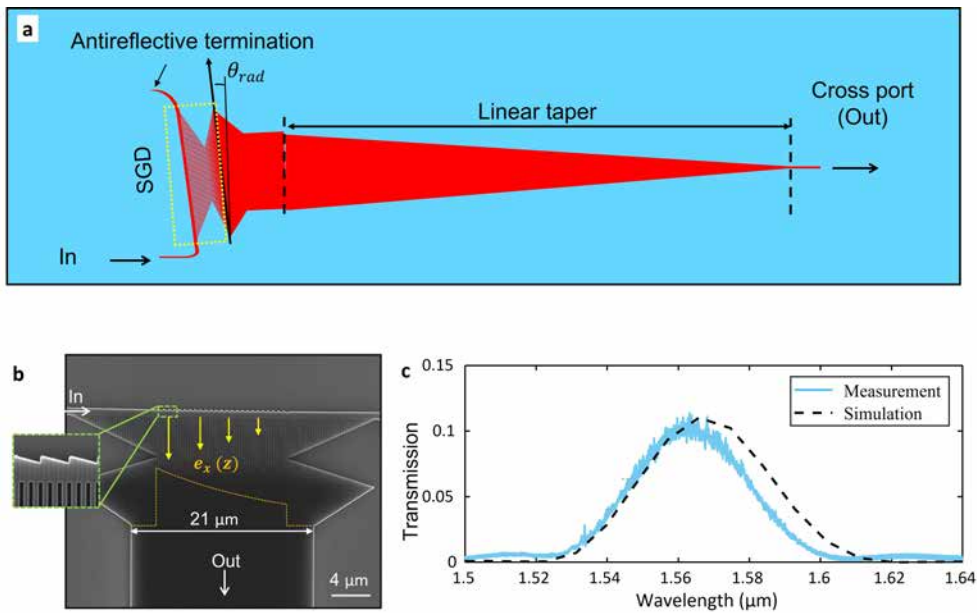
A full 3D FDTD simulation of the complete back-to-back architecture was per-

formed to evaluate the device performance. Figure 2.8(c) shows the power transmitted to the through and cross ports and the power lost due to out-of-chip radiation, as a function of the wavelength. Cross port insertion loss is 4.5 dB (37%) near the central wavelength, i.e. only 0.2 dB loss penalty compared to stand-alone device simulation ( $2 \cdot 2.15 \text{ dB} = 4.3 \text{ dB}$ ).

The deflector exhibits a remarkably broad 1 dB bandwidth of 150 nm, which seems counter-intuitive due to the strong wavelength dependency of the radiation angle of a single device [Bock2012]. This is because of the flip-back geometry in which both the transmitting and receiving deflectors scan synchronously with the wavelength and the two deflectors working in tandem compensate the wavelength dependence of each other.

### 2.3.2 Experimental validation

In order to perform a preliminary experimental verification, we designed a uniform DBD that comprises 25 identical periods (overall length  $15 \mu\text{m}$ ), as shown in Fig. 2.9(a). A constant radiation strength ( $\alpha = 0.01 \mu\text{m}^{-1}$ ) is used along the entire DBD. The deflector is designed such that 13% of the input power is radiated to the FPR slab and guided to the output (cross) port, while the remaining power (72%) remains in the Si-wire waveguide, terminated with an anti-reflective structure. The beam that is radiated to the FPR slab is captured by a wide waveguide, rotated to ensure normal incidence at the central wavelength (see Fig. 2.9(a)). The waveguide width ( $21 \mu\text{m}$ ) was chosen to maximize the field coupling efficiency.



**Figure 2.9:** a) Schematics of a DBD test structure with a linear taper. b) scanning electron microscope (SEM) image of the fabricated DBD. c) Simulated and measured spectral transmittance of the device.

This device was fabricated on a standard SOI wafer with 220 nm Si layer and 2- $\mu\text{m}$  buried oxide (BOX) using 100 keV electron beam lithography patterning and reactive ion etching. A SEM image of the fabricated device is shown in Fig. 2.9(b). Detailed results were reported in [Hadij-ElHouati2019] (see appendix A.1).

---

### 2.3. Complete design of an apodized DBD

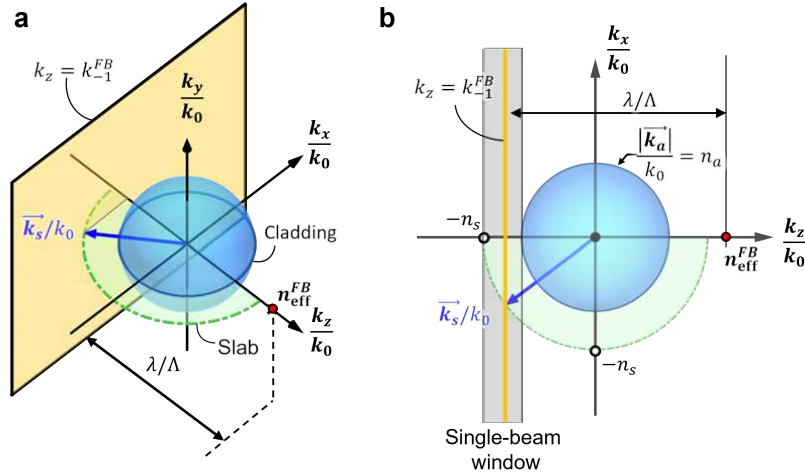
---

Figure 2.9(c) shows the measured transmittance. The transmittance is slightly lower ( $\sim 0.1$ ) than the designed value (0.13), which was found to be due to the limited resolution of the patterning process. This was confirmed by simulating a device with parameters determined by measuring the SEM images. The simulation results for the structure with the parameters as measured by SEM is included in Fig. 2.9(b). The simulation and measurement yield similar values of the maximum transmittance ( $\sim 0.1$ ), the central wavelength ( $1.565 \mu\text{m}$ ) and the bandwidth ( $\sim 40 \text{ nm}$ ), demonstrating that the fabricated structure indeed is radiating in the designed direction and that the experimental radiation strength is similar to the simulated value for the geometry determined by SEM.

## 2.4 Lossless Bragg deflector

In this section, we will introduce the single beam condition for suppressing off-chip radiation in Bragg deflectors. Leveraging this new concept, a low loss deflector was designed. The results described in this section were originally published in [Hadij-ElHouati2021] (see appendix A.2).

### 2.4.1 The single-beam condition



**Figure 2.10:** K-space diagram for a deflector in the 3D k-space a) and in the XZ plane b). The single-beam diffraction window is shown shaded in grey in b). The blue arrow indicates the propagation direction vector of the single beam permitted in the slab for the period  $\Lambda$  which fulfils the single beam condition.

As we discussed in the previous section, off-chip radiation is the main source of loss in DBDs. This loss can be mitigated by frustrating the momentum matching of the -1st harmonic in the surrounding media (i.e. silicon dioxide) while permitting the matching only within the lateral slab waveguide. Both conditions can be met by judiciously engineering the slab waveguide and the -1st harmonic wavenumber  $k_{-1}^{FB}$ . The frustration of phase-matching condition of -1st diffraction order with the surrounding medium  $n_a$  is achieved when:

$$|k_{-1}^{FB}| > n_a k_0, \quad (2.28)$$

while to allow phase-matching within the slab requires:

$$|k_{-1}^{FB}| < n_s k_0. \quad (2.29)$$

In the k-diagram of Fig. 2.10, the blue sphere surface with radius  $n_a$  represents the wave-vectors for all the possible plane waves propagating in the surrounding medium. The green circumference with radius  $n_s$  represents the wave-vectors for all waves propagating within the slab. The yellow plane corresponds to the wave-vectors fulfilling the phase-matching condition with the -1st order ( $k_z/k_0 = n_{\text{eff}}^{FB} - \lambda/\Lambda$ ). The intersection of this plane with the sphere indicates the waves allowed in the medium  $n_a$ . The intersection of the yellow plane with the green circumference yields the wave-vector of the -1st

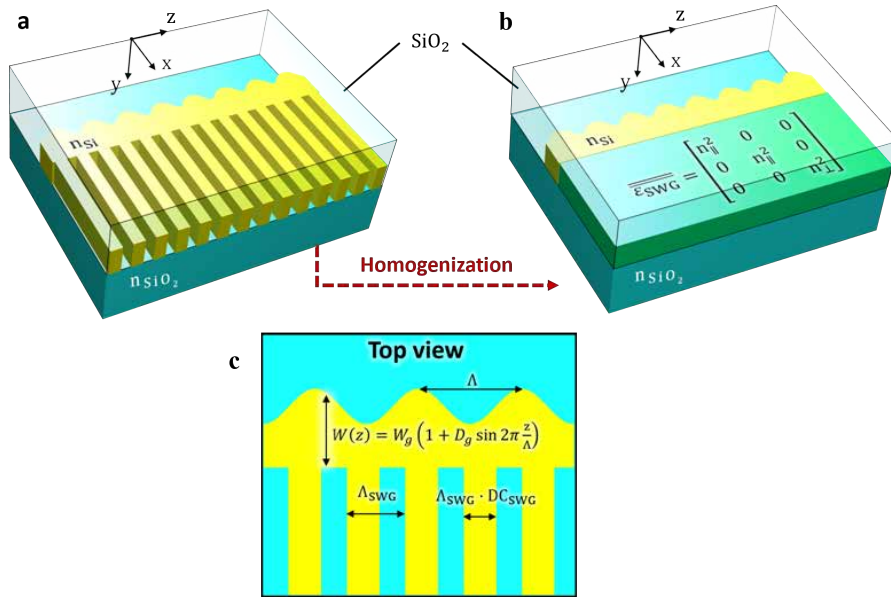
diffraction order excited in the slab. From this diagram it follows that to achieve only one diffracted beam within the slab, the wavelength-to-pitch ratio needs to be designed so that the yellow plane does not intersect the blue sphere but it does intersect the green circumference. From expressions (2.29) and (2.28), as well as the k-diagram of Fig. 2.10 the single-beam condition is:

$$n_a + n_{\text{eff}}^{\text{FB}} < \frac{\lambda}{\Lambda} < n_s + n_{\text{eff}}^{\text{FB}}. \quad (2.30)$$

This single-beam radiation window further restricts the single-order window of expression (2.7).

#### 2.4.2 Verification of the single-beam condition

To further investigate the single-beam condition and verify its validity on a practical device example, a simple waveguide grating (shown in Fig. 2.11(a)) was analysed using Floquet-Bloch mode analysis. This grating modulation is sinusoidal, i.e. not blazed. It is important to note that blazed grating profile is no longer required to optimize the efficiency since the single-beam condition intrinsically provides maximum efficiency into a single beam. Advantageously, sinusoidal grating shape has no sharp edges or corners which would be challenging to fabricate being prone to smoothing during the patterning process.



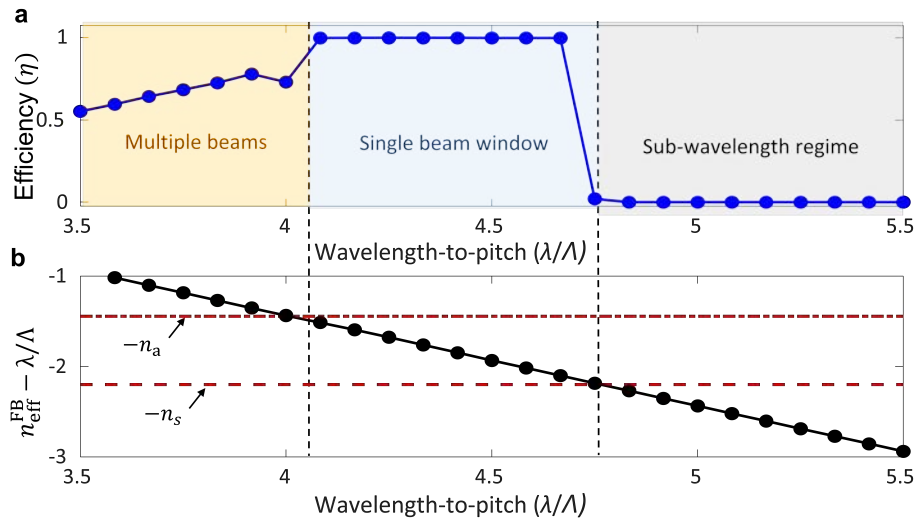
**Figure 2.11:** a) Schematic of a periodic section of the sinusoidal deflector and b) homogenized model in which the SWG region is substituted by an anisotropic material. c) Geometric parameters of the SWG slab and the sinusoidal grating.

In general, to compute the Floquet-Bloch mode of this structure the simulation box needs to be extended along the propagation direction to contain a whole number of periods of both the diffractive grating and the SWG structure. For the conventional deflector, this was achieved by choosing the SWG period equal half the pitch of the diffractive element. However, using a submultiple of the grating period for the SWG pitch is

not suitable in this case as the single-beam condition requires small waveguide grating periods ( $\Lambda < 400 \text{ nm}$  @  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ ) which would result in a prohibitively small SWG period, difficult to fabricate. To circumvent this issue, anisotropic homogenization of the SWG metamaterial [Luque-González2021] has been used to substitute the periodic SWG region with an homogenous anisotropic material  $\overline{\overline{\epsilon}}_{\text{SWG}} = \text{diag}[n_{\parallel}^2, n_{\parallel}^2, n_{\perp}^2]$ , so that the simulation cell no longer needs to contain an integer number of SWG periods.

The SWG pitch and duty cycle have been set as  $\Lambda_{\text{SWG}} = 200 \text{ nm}$  and  $\text{DC}_{\text{SWG}} = 0.5$  for MFS larger than  $100 \text{ nm}$ . Using SWG homogenization anisotropic model [Luque-González2021], it is obtained  $n_{\perp} = 1.9$  and  $n_{\parallel} = 2.78$ . The slab formed by this anisotropic material, for the TE polarization, supports a continuum of modes whose wave-vectors describe an ellipse in the  $k_z$ - $k_x$ , unlike the circumference in the isotropic case illustrated in Fig. 2.10. This difference does not fundamentally affect the single-beam behaviour, hence we use here the slab mode with an effective index of  $n_s = 2.2$ .

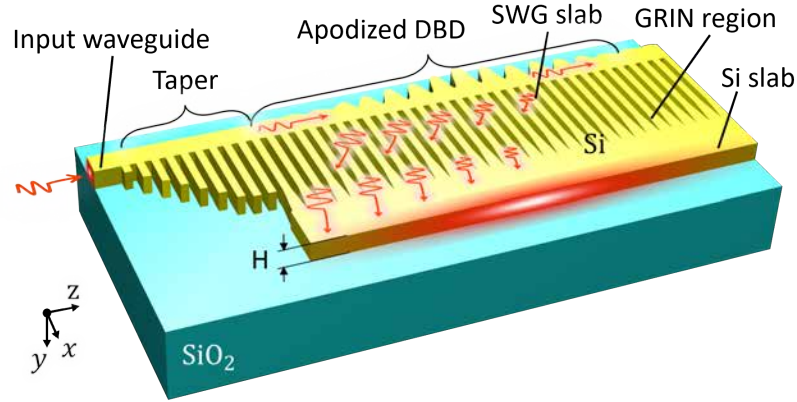
The homogenized structure shown in Fig. 2.11(b) was studied via Floquet-Bloch mode analysis, for  $W_g = 600 \text{ nm}$  and  $D_g = 0.25$ . For this geometry, the waveguide grating Floquet-Bloch mode effective index is  $\sim 2.6$ . Hence, the single-beam condition is met for  $\lambda/\Lambda = [4.05, 4.8]$ . Figure 2.12 shows the calculated diffraction efficiency  $\eta$  of the -1st diffraction order in the SWG slab [Fig. 2.12(a)] and the effective index corresponding to the same diffraction order [Fig. 2.12(b)] as a function of  $\lambda/\Lambda$ . The diffraction efficiency to the -1st order in the SWG slab is 100% for  $\lambda/\Lambda \in [4.05, 4.75]$ , which is in excellent agreement with the single beam condition (Eq. (2.30)), as shown in Fig. 2.12. The width of the single-beam window is controlled with the duty cycle  $\text{DC}_{\text{SWG}}$  which determines the relevant SWG slab mode index  $n_s$ . With increasing  $\text{DC}_{\text{SWG}}$ ,  $n_s$  increases and the single beam window broadens, hence a wide wavelength range can be achieved. On the other hand, ensuring the lateral confinement of the channel waveguide mode requires  $n_s < n_{\text{eff}}^{\text{FB}}$ .



**Figure 2.12:** Floquet-Bloch analysis of the 3D homogeneous anisotropic structure shown in Fig. 2.11(b). a) Diffraction efficiency  $\eta$  for the -1st diffraction order in the SWG slab. b) Effective index for the -1st diffraction order as a function of the wavelength-to-pitch ratio ( $\lambda/\Lambda$ ). Red lines indicate the limiting values for the single beam operation.  $W_g = 600 \text{ nm}$ ,  $D_g = 0.25$ ,  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ ,  $\Lambda_{\text{SWG}} = 200 \text{ nm}$  and  $\text{DC}_{\text{SWG}} = 0.5$



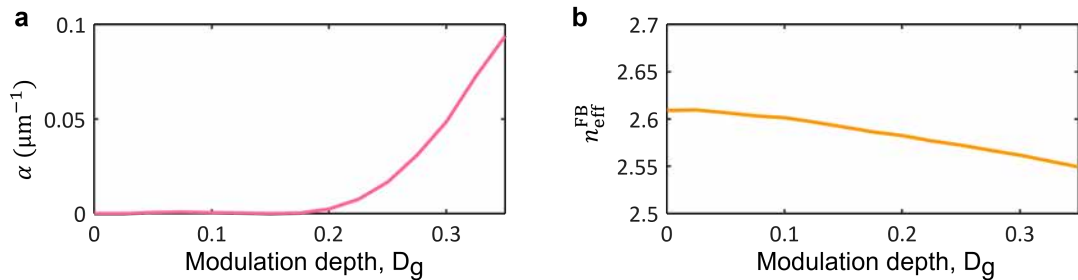
## 2.4.3 Lossless DBD design



**Figure 2.13:** Schematic of the lossless distributed Bragg deflector beam expander based on sinusoidal diffractive elements. Red arrows indicate the local energy flow (Poynting vector) direction. The silicon dioxide cladding is not shown for the sake of clarity.

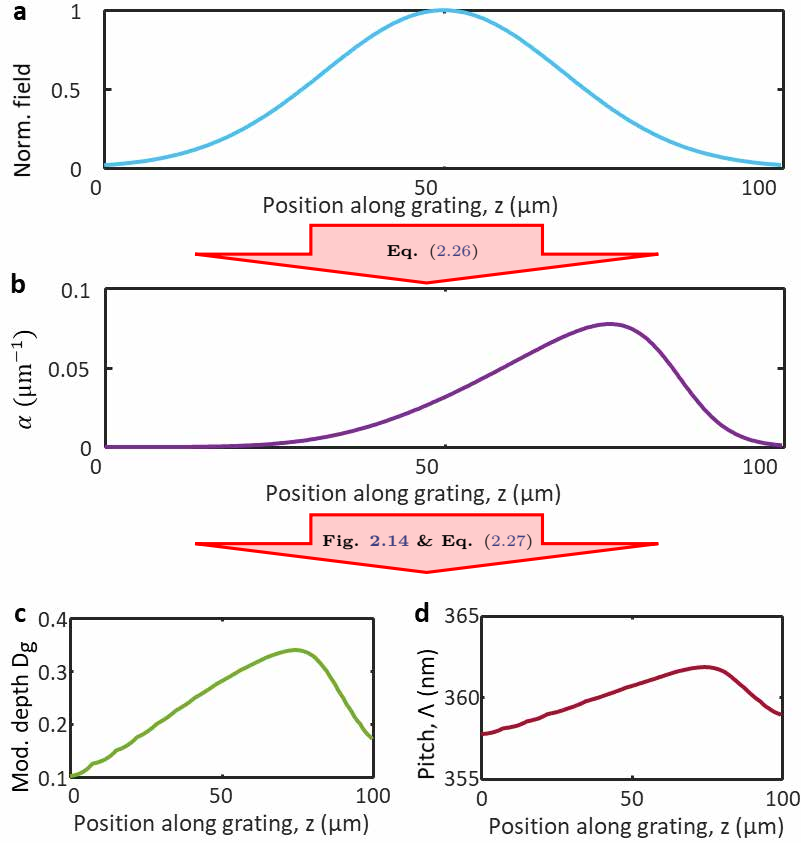
We designed a distributed Bragg deflector device operating in the single-beam regime. The device, as shown in Fig. 2.13, includes input and output adiabatic tapers, an apodized waveguide grating and an SWG slab that is transitioned to a silicon slab via a GRIN adaptation region. Besides the suppression of radiation losses, a near-Gaussian diffracted field will be synthesized. For this, we follow the apodization procedure described in section 2.2.3. Compared with the blazed grating of section 2.3, the sinusoidal grating used here is much simpler to design as high efficiency is always assured due to single beam condition fulfilment. The grating strength can be easily controlled by varying the modulation depth  $D_g$  of the grating, without affecting the waveguide effective index providing  $D_g$  is small.

First, the grating period was set to 360 nm to fulfil the single beam condition near the central wavelength of 1550 nm. Then the effect of the modulation depth  $D_g$  on the grating strength and effective index was studied, for a waveguide width  $W_g = 600$  nm. The calculated grating radiation strength and effective index are shown in figures 2.14(a) and 2.14(b), respectively. The gratings strength is substantially affected by  $D_g$  while the effective index changes only slightly.



**Figure 2.14:** a) Grating strength (coupling coefficient)  $\alpha$  and b) Floquet-Bloch index  $n_{\text{eff}}^{\text{FB}}$ , as a function of modulation depth  $D_g$  calculated via Floquet-Bloch modal analysis.  $W_g = 600$  nm,  $\lambda = 1.55$   $\mu\text{m}$ ,  $\Lambda_{\text{SWG}} = 200$  nm,  $\text{DC}_{\text{SWG}} = 0.5$ , and  $\Lambda = 360$  nm.

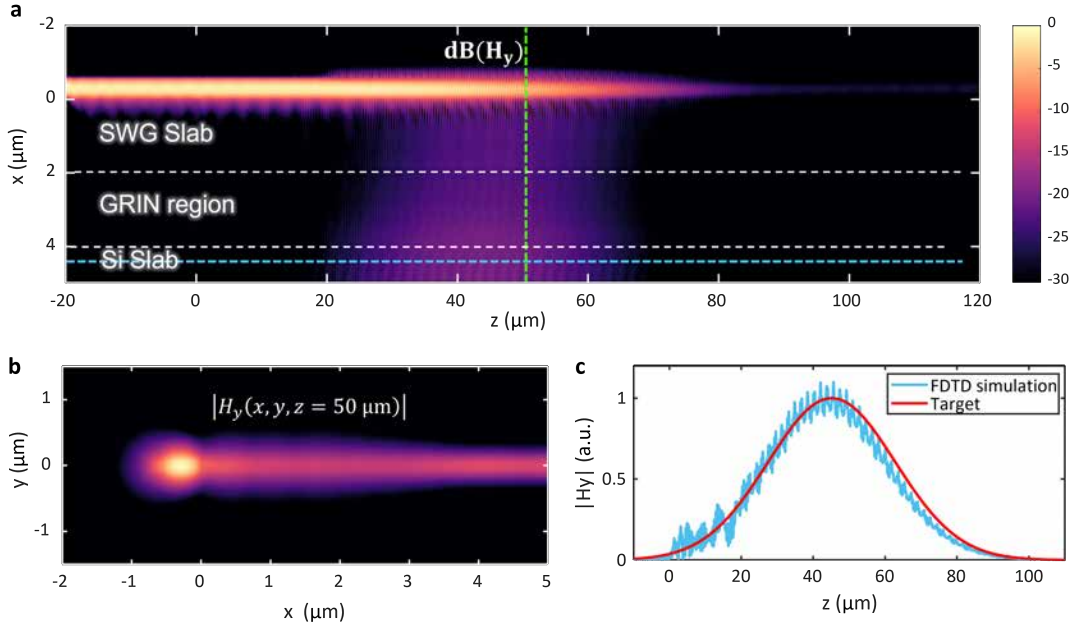
The DBD was designed to generate a Gaussian beam with a MFD of  $50\ \mu\text{m}$ . To achieve this, the required grating strength to yield the targeted field profile was calculated using Eq. (2.26). Then the grating modulation  $D_g(z)$  was calculated from the grating strength. The design flow is illustrated in Fig. 2.15 and the resulting modulation depth profile  $D_g(z)$  is shown in 2.15(c).



**Figure 2.15:** a) Target beam profile and the corresponding b) radiation strength  $\alpha(z)$  computed by Eq. (2.26). c) Grating modulation depth along the deflector structure obtained by mapping the grating strength via Fig. 2.14(a). d) Grating pitch obtained from Eq. (2.27) and the effective index of Fig. 2.14(b).

#### 2.4.4 Results and discussion

The complete device was simulated using 3D FDTD. Figure 2.16(a) shows the calculated magnetic field  $H_y$  (XZ cross-section taken at the centre of the silicon layer). It is observed that the Si-wire waveguide mode is progressively radiated in the positive  $x$  direction, while radiation in the negative  $x$  direction is efficiently suppressed, even without blazing effect. A small power fraction ( $< 0.5\%$ ) remains in the waveguide at the end of the grating, as originally designed. Figure 2.16(b) shows a transverse cross-section of the field near the centre of the grating. The radiated field is directed into the silicon slab with high directionality while the off-chip radiation is suppressed. Furthermore, while the field confinement in the  $y$  direction slowly increases through the GRIN region, there is no significant radiation loss at this transition. The diffracted



**Figure 2.16:** a) 3D FDTD simulation of  $H_y$  field evolution along the full DBD device. b) Transversal cross-section of  $H_y$  field in an XY plane near the centre of the grating ( $z = 50 \mu\text{m}$ , dashed green line in a). c)  $H_y$  field distribution in the slab waveguide (along the dashed blue line in a). The target profile is shown for comparison.

field profile along the blue dashed line in Fig. 2.16(a) is shown in Fig. 2.16(c). It is observed that the simulated diffracted beam profile (Fig. 2.16(c), light blue curve) accurately matches the target field (Fig. 2.16(c), red curve). We observe a small ripple on the simulated field which is likely caused by residual reflections along the propagation direction. However, the ripple influence on the coupling efficiency is negligible as the overlap integral of the simulated and target field exceeds 97%. The total insertion loss along the entire path from the input Si-wire waveguide to the collimated slab beam is below 0.3 dB. This is almost 2 dB improvement over the classical design of section 2.3. Interestingly, this was achieved by using a simple sinusoidal diffractive element which is easier to fabricate compared to the blazed shape with sharp corners required in the conventional DBD to increase the efficiency.

In summary, we have presented a new strategy for implementing distributed Bragg deflectors (DBDs) in silicon photonics. We showed that off-chip radiation losses can be practically eliminated by leveraging a single-beam phase-matching condition and sub-wavelength metamaterial refractive index engineering. To demonstrate this new concept, we have designed a distributed Bragg deflector beam expander using a computationally efficient Floquet-Bloch analysis of individual elements. The 3D FDTD simulation of the complete device yields excellent agreement with the target design and confirmed a record low insertion loss of 0.3 dB. The ability to precisely shape slab confined beams with negligible loss as demonstrated in this work paves the way for practical implementations of new types of devices based on distributed Bragg deflectors in integrated photonics. Two examples of such new devices - a wavelength demultiplexer and an ultra compact antenna feeder - are discussed in the following two chapters of this Thesis.

## 2.5 References

- [Allen2019] M. B. Allen and E. L. Isaacson. *Numerical Analysis for Applied Science*. Second edition. Pure and Applied Mathematics. Hoboken, NJ: Wiley, 2019. 1 p. ISBN: 978-1-119-24565-0.
- [Bock2012] P. J. Bock, P. Cheben, J. H. Schmid, A. V. Velasco, A. Delâge, S. Janz, D.-X. Xu, J. Lapointe, T. J. Hall, and M. L. Calvo. “Demonstration of a Curved Sidewall Grating Demultiplexer on Silicon”. In: *Opt. Express* 20.18 (Aug. 27, 2012), p. 19882. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.20.019882](https://doi.org/10.1364/OE.20.019882).
- [Dami o2015] A. Damião. *Filter Diagonalization Method - Matlab*. 2015. URL: <https://github.com/adamiao/filter-diagonalization-method-matlab>.
- [Hadij-ElHouati2019] A. Hadij-ElHouati, P. Cheben, A. Ortega-Mo ux, J. G. Wangüemert-Pérez, R. Halir, J. H. Schmid, and  . Molina-Fernández. “Distributed Bragg Deflector Coupler for On-Chip Shaping of Optical Beams”. In: *Opt. Express* 27.23 (Nov. 11, 2019), pp. 33180–33193. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.27.033180](https://doi.org/10.1364/OE.27.033180).
- [Hadij-ElHouati2021] A. Hadij-ElHouati, P. Cheben, A. Ortega-Mo ux, J. G. Wangüemert-Pérez, R. Halir, J. de Oliva Rubio, J. H. Schmid, and I. Molina-Fernández. “High-Efficiency Conversion from Waveguide Mode to on-Chip Beam Using a Metamaterial Engineered Bragg Deflector”. In: *Opt. Lett.* 46.10 (May 15, 2021), pp. 2409–2412. ISSN: 0146-9592, 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.420993](https://doi.org/10.1364/OL.420993).
- [Joannopoulos2008] J. D. Joannopoulos, ed. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*. 2nd ed. Princeton: Princeton University Press, 2008. 286 pp. ISBN: 978-0-691-12456-8.
- [Luque-Gonz alez2021] J. M. Luque-González, A. Sánchez-Postigo, A. Hadij-ElHouati, A. Ortega-Mo ux, J. G. Wangüemert-Pérez, J. H. Schmid, P. Cheben,  . Molina-Fernández, and R. Halir. “A Review of Silicon Subwavelength Gratings: Building Break-through Devices with Anisotropic Metamaterials”. In: *Nanophotonics* 10.11 (Aug. 26, 2021), pp. 2765–2797. ISSN: 2192-8614. DOI: [10.1515/nanoph-2021-0110](https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0110).
- [Mandelstam2001] V. Mandelstam. “FDM: The Filter Diagonalization Method for Data Processing in NMR Experiments”. In: *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy* 38.2 (Mar. 2001), pp. 159–196. ISSN: 00796565. DOI: [10.1016/S0079-6565\(00\)00032-7](https://doi.org/10.1016/S0079-6565(00)00032-7).
- [Mathworks Inc2017] Mathworks Inc. *MATLAB Version 9.3.0.713579 (R2017b)*. Natick, Massachusetts: The Mathworks, Inc., 2017.
- [Neuhauser1990] D. Neuhauser. “Bound State Eigenfunctions from Wave Packets: Time→energy Resolution”. In: *The Journal of Chemical Physics* 93.4 (Aug. 15, 1990), pp. 2611–2616. ISSN: 0021-9606, 1089-7690. DOI: [10.1063/1.458900](https://doi.org/10.1063/1.458900).
- [Synopsys Inc2020] Synopsys Inc. *FullWAVE User Guide*. 2020. URL: <https://www.synopsys.com/photonic-solutions/rsoft-photonic-device-tools/passive-device-fullwave.html>.
- [Taflove2005] A. Taflove and S. C. Hagness. *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*. 3rd ed. Artech House Antennas and Propagation Library. Boston: Artech House, 2005. 1006 pp. ISBN: 978-1-58053-832-9.
- [Tamir1977] T. Tamir and S. T. Peng. “Analysis and Design of Grating Couplers”. In: *Appl. Phys.* 14.3 (Nov. 1, 1977), pp. 235–254. ISSN: 1432-0630. DOI: [10.1007/BF00882729](https://doi.org/10.1007/BF00882729).

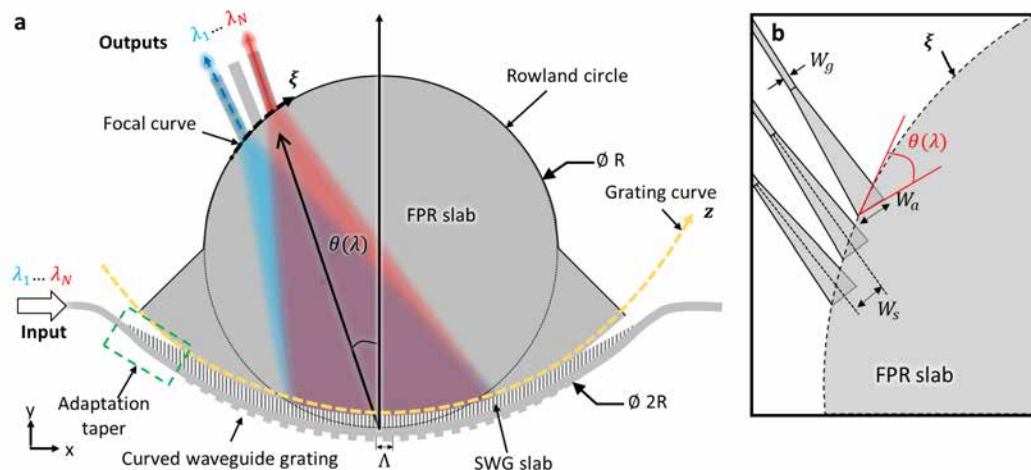
- [Wall1995] M. R. Wall and D. Neuhauser. “Extraction, through Filter-diagonalization, of General Quantum Eigenvalues or Classical Normal Mode Frequencies from a Small Number of Residues or a Short-time Segment of a Signal. I. Theory and Application to a Quantum-dynamics Model”. In: *The Journal of Chemical Physics* 102.20 (May 22, 1995), pp. 8011–8022. ISSN: 0021-9606, 1089-7690. DOI: [10.1063/1.468999](https://doi.org/10.1063/1.468999).



## 3 Curved waveguide grating demultiplexers

This chapter is dedicated to curved waveguide grating (CWG) wavelength (de)multiplexing devices. CWGs use a curved deflector as the dispersive element to separate or combine the different wavelengths. Suggested as a promising alternative to conventional architectures [Hao2006; Bock2008], their first experimental demonstrations confirmed substantial losses that hindered their immediate applicability [Bock2012]. This chapter presents various CWG (de)multiplexer architectures that effectively mitigate losses. This is achieved by leveraging the single-beam condition. First, the CWG demultiplexer geometry and working principle are presented. Then, we outline the general design procedure used in this work, including an efficient yet accurate simulation technique to validate the designs. Various low-loss CWG devices are presented, including a C-band 8-channel demultiplexer, a tunable demultiplexer and a flattop CWG based on bimodal output waveguides.

### 3.1 CWG operation principle



**Figure 3.1:** a) Schematic of an off-axis curved waveguide grating demultiplexer in the SOI platform. Grey represents un-etched areas (silicon). b) Detail of the output waveguides near the focal curve.

Figure 3.1(a) shows a typical CWG geometry in the SOI platform. The CWG comprises a curved grating deflector, an SWG slab region, an free propagation region (FPR) and an array of receiver waveguides connected to the FPR [see Fig. 3.1(b)]. The deflector is curved following an arc of radius  $R$  and the output waveguides are positioned on a circle of radius  $R/2$  - the Rowland circle. As the light propagates along the deflector it is diffracted towards the FPR slab. A near-Gaussian field profile is produced along the grating curve ( $z$ ) and focused within the FPR slab onto the output waveguide apertures located on the Rowland circle (focal curve  $\xi$ ). As the beam propagation angle  $\theta$  in the FPR slab varies with the wavelength, the focal point shifts along the Rowland circle and different wavelengths are coupled to distinct output

waveguides. This angle  $\theta$  is given by the grating equation:

$$\theta = \arcsin \left( \frac{n_{\text{eff}}^{\text{FB}}(\lambda) - \lambda/\Lambda}{n_{\text{FPR}}} \right), \quad (3.1)$$

where  $n_{\text{FPR}}$  is the FPR slab effective index,  $n_{\text{eff}}^{\text{FB}}$  is the effective index of the grating deflector Floquet-Bloch mode, and  $\Lambda$  is the grating period.

To achieve the low-loss operation the single-beam condition (see section 2.4.1) needs to be met. For this geometry, the single-beam condition can be expressed as:

$$-\arcsin \left( \frac{n_{\text{SWG}}}{n_{\text{FPR}}} \right) < \theta < -\arcsin \left( \frac{n_a}{n_{\text{FPR}}} \right), \quad (3.2)$$

where  $n_a$  is the cladding index (typically  $\text{SiO}_2$ ) and  $n_{\text{SWG}}$  is the effective index of the SWG slab mode. We notice that near-normal ( $\theta \approx 0^\circ$ ) designs are no possible if low-loss operation is desired since the single beam condition requires  $\theta < -\arcsin \left( \frac{n_a}{n_{\text{FPR}}} \right)$ . For the 220 nm SOI platform considered here,  $n_a = 1.45$  and  $n_{\text{FPR}} = 2.85$ , yielding  $\theta < -30^\circ$ . We refer to this type of demultiplexers as off-axis CWGs.

The displacement  $\delta\xi$  along the focal curve can be expressed as a function of the wavelength change  $\delta\lambda$  as:

$$\delta\xi = RD\delta\lambda, \quad (3.3)$$

where  $R$  is the deflector curvature radius and  $D$  is the angular dispersion of the grating deflector, which can be readily obtained from equation (3.1) as:

$$D = \frac{\partial\theta}{\partial\lambda} = \frac{n_{g,\text{FPR}} \sin\theta - n_{g,\text{FB}}}{\lambda n_{\text{FPR}} \cos\theta}, \quad (3.4)$$

where,  $n_{g,\text{FPR}}$  and  $n_{g,\text{FB}}$  are the group indexes of the FPR slab fundamental mode and of the grating waveguide Floquet-Bloch mode, respectively.

Beam propagation in the FPR slab region can be modelled by the scalar 2D Rayleigh-Sommerfeld diffraction integral [Orfanidis2002] as:

$$E(\vec{\mathbf{r}}) = \int_A 2E(\vec{\mathbf{r}}') \frac{\partial G(|\vec{\mathbf{r}}' - \vec{\mathbf{r}}|)}{\partial \hat{\mathbf{n}}'} \cdot d\vec{\ell}', \quad (3.5)$$

where  $G(R) = e^{-jkR}/(4\pi R)$ ,  $\vec{\mathbf{r}}'$  is the position vector on the aperture curve  $A$ ,  $\vec{\mathbf{r}}$  is the observation point,  $\hat{\mathbf{n}}'$  is the unitary normal vector along the aperture curve,  $E(\vec{\mathbf{r}}')$  is the field complex amplitude along the curve and,  $E(\vec{\mathbf{r}})$  is the field complex at the observation point  $\vec{\mathbf{r}}$  [ see Fig. 3.2].

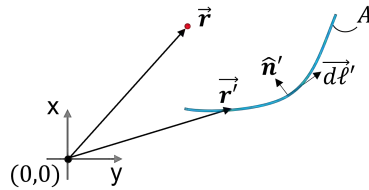


Figure 3.2: Schematic diagram showing the geometrical objects of equation 3.5.



## 3.2 Off-axis CWG design

The design strategy used in previously reported CWG for near-normal diffraction yields high loss and crosstalk for the off-axis demultiplexer design due to the sub-optimal spot shape generated at the focal plane [Hadij-ElHouati2021]. Therefore, we developed a new CWG design strategy aiming to minimize insertion loss. To achieve this, we leverage the single beam condition, and match the field distribution at the Rowland circle to the fundamental mode of the output waveguides. We target the most compact design, i.e with a minimum  $R$ . The design procedure includes the following steps:

1. The diffraction angle  $\theta_0$  at the central wavelength is set to fulfil the single-beam condition. When condition (3.2) is evaluated for a 220 nm SOI platform, and considering a typical SWG slab effective index of  $n_{\text{SWG}} = 2.2$ , it yields a single-beam angular range of  $-50^\circ < \theta < -30^\circ$ .
2. Select the deflector geometry and analyse a typical diffraction element to yield the selected diffraction angle  $\theta_0$  and compute the dispersion  $D$  used in the following steps.
3. Choose the receiver waveguide aperture  $W_a$  which is related to the angular mode field radius (MFR) of the diffracted beam  $\text{MFR}_{\varphi_0}$  and, consequently, the deflector angular length (i.e.  $\Phi_L = L/R$ ). Smaller  $W_a$  permits to reduce the spacing of the output waveguides  $W_s$  i.e. for the same channel separation one can use a smaller grating radius  $R$  and reduce device footprint.
4. The nominal waveguide separation  $W_s$  at the focal curve is chosen for a specific level of crosstalk:

$$\text{XT} = -4.34 \left( \frac{W_s}{\text{MFR}_\xi} \right)^2 \text{ [dB]}, \quad (3.6)$$

where  $\text{MFR}_\xi$  is the mode field radius of the receiver waveguide aperture  $W_a$ .

5. Select the grating radius  $R$  required for the nominal channel separation  $\Delta\lambda$ :

$$R = \frac{W_s}{D \cdot \Delta\lambda}. \quad (3.7)$$

6. Compute the field profile at the grating curve  $E_G(z)$ , to be synthesized by the grating deflector. Here, the Rayleigh-Sommerfeld scalar diffraction integral, Eq. (3.8), is used to find the field distribution  $E_{RS}(z)$  at the grating curve when the fundamental mode is injected into the central output waveguide. Using the reciprocity principle [Potton2004], the complex conjugate of the obtained field  $E_{RS}(z)$  needs to be produced by the grating deflector, i.e  $E_G(z) = E_{RS}^*(z)$ .
7. Finally, the grating deflector apodization and chirping function are designed following the procedure described in section 2.2.3 to synthesize the field profile  $E_G(z)$ .

### 3.3 Simulation

It is desirable to simulate the full demultiplexer in 3D **FDTD**. Nevertheless, the large device footprint ( $> 100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ) makes this task computationally intractable. To circumvent this limitation, we developed an efficient and accurate simulation method. We separate the full simulation problem into three sub-problems that can be solved separately with reasonable computing resources and high accuracy:

1. **Deflector analysis.** The deflector bend is straightened and analysed via full 3D **FDTD** analysis. By straightening the bend, the simulation window is substantially reduced with a negligible penalty on accuracy. A pulsed sinusoidal temporal variation is used to evaluate the full bandwidth of interest in a single simulation. From this simulation, we compute the complex field profile generated by the deflector  $E_G(z, \lambda)$  in the **FPR** slab and the power fraction  $P_{\text{slab}}(\lambda)$  coupled to the **FPR** slab versus the wavelength, within the bandwidth of interest.
2. **Propagation in the **FPR** slab.** The propagation through the **FPR** slab is computed analytically via the Rayleigh-Sommerfeld integral. The field obtained in the previous step,  $E_G(z, \lambda)$ , is positioned at the grating curve [ $z$  in Fig. 3.1(a)] and the Rayleigh-Sommerfeld diffraction integral is used to propagate the field in the slab, forming the field  $E_F(\xi, \lambda)$  at the focal curve [ $\xi$  in Fig. 3.1].
3. **Overlap integral.** The overlap integral is employed to compute the power fraction coupled to the fundamental mode  $\Psi_{0,n}(\xi, \lambda)$  of the  $n$ th output waveguide by the field produced by the grating deflector at the focal plane,  $E_F(\xi, \lambda)$ :

$$\text{OL}_n(\lambda) = \frac{\int E_F(\xi, \lambda) \Psi_{0,n}^*(\xi, \lambda) d\xi}{\sqrt{\int |E_F(\xi, \lambda)|^2 d\xi} \sqrt{\int |\Psi_{0,n}(\xi, \lambda)|^2 d\xi}}. \quad (3.8)$$

The spectral transmission  $T_n(\lambda)$  from the input to the  $n$ th output waveguide is computed using  $P_{\text{slab}}(\lambda)$  and  $\text{OL}_n(\lambda)$  as:

$$T_n(\lambda) = P_{\text{slab}}(\lambda) |\text{OL}_n(\lambda)|^2. \quad (3.9)$$

### 3.4 Low-loss CWG demultiplexer demonstration

In this section, we briefly introduce the **CWG** (de)multiplexer reported in [Hadij-ElHouati2021], for a detailed explanation we refer the reader to the original manuscript included in appendix A.3 and the supplemental material included in appendix A.4.

We aim for an 8 channel (de)multiplexer with centre wavelength  $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ , channel separation  $\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$ , and in-plane polarization, i.e **TE**. The device is designed for an **SOI** platform comprising a 220-nm-thick silicon layer, a 2- $\mu\text{m}$  **BOX** and a 2- $\mu\text{m}$  **SiO<sub>2</sub>** upper-cladding.

We followed the procedure outlined in section 3.2 to design the demultiplexer with specifications summarized in table 3.1. The demultiplexer comprises a 164- $\mu\text{m}$ -long deflector, curved following a circular arc of radius  $R = 177 \mu\text{m}$ . The output waveguides

### 3.4. Low-loss CWG demultiplexer demonstration

Central wavelength	$\lambda_0$	1550 nm
Channel separation	$\Delta\lambda$	10 nm
Crosstalk	XT	-60 dB

Table 3.1: Target demultiplexer specifications.

have an aperture width  $W_a$  of  $2.1 \mu\text{m}$  near the FPR slab and are spaced  $W_s = 2.8 \mu\text{m}$  centre-to-centre. The geometrical parameters of this design are summarized in table 3.2. A detailed description of the deflector grating geometry is included in the appendix A.4.

Grating curvature radius	$R$	$177 \mu\text{m}$
Deflector length	$L$	$164 \mu\text{m}$
Receiving waveguide width	$W_a$	$2.1 \mu\text{m}$
Waveguide separation	$W_s$	$2.8 \mu\text{m}$

Table 3.2: Demultiplexer key geometrical parameters.

The device was simulated using the procedure described in section 3.3, yielding the transmission spectra shown in Fig. 3.3(a). The simulation predicts insertion loss as low as 0.5 dB near the central wavelength, rolling off to 2 dB and 2.7 dB for the channels 1 and 8, respectively. For longer wavelengths, the increase in loss is caused by higher residual power remaining at the end of the grating waveguide, as shown by the dashed curve in Fig. 3.3(b). This is caused by the grating strength decreasing for longer wavelengths. On the other hand, the efficiency decrease at shorter wavelengths is caused by the onset of off-chip radiation loss [dotted yellow curve in Fig. 3.3(b)].

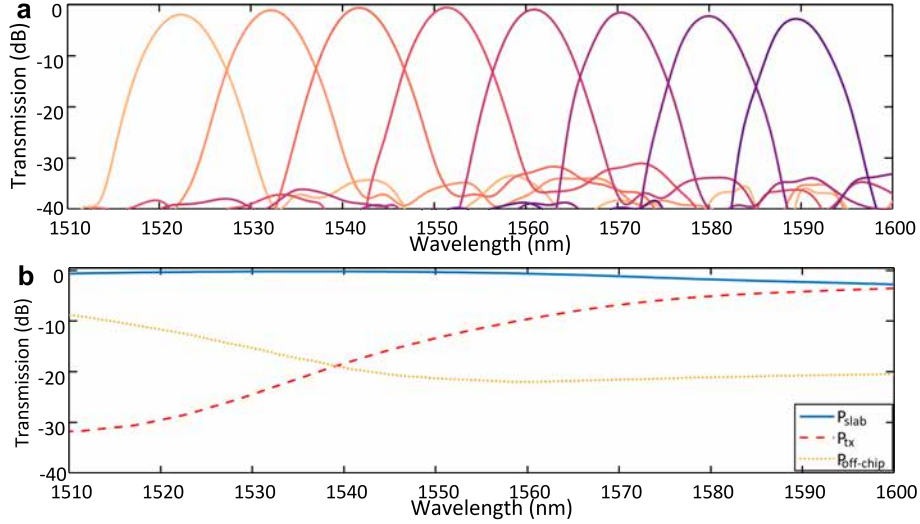
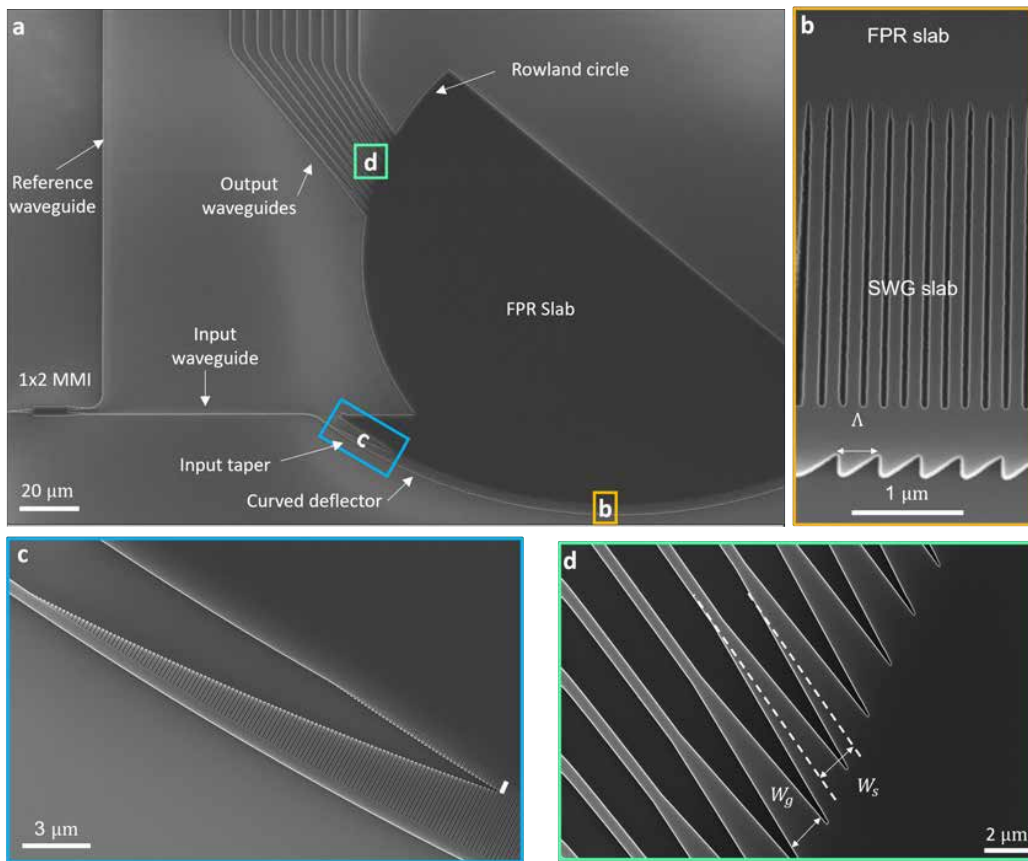


Figure 3.3: a) Simulated transmission from the input to the output waveguides (device insertion loss) as a function of the wavelength. b) The power coupled to the slab region (solid blue curve), residual power at the end of the grating waveguide (dashed red curve) and the power radiated off-chip (dotted yellow curve).

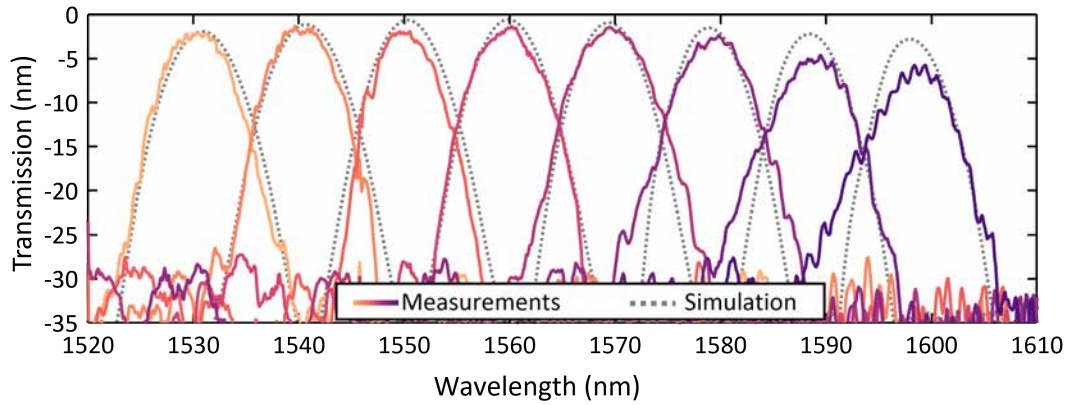
This device was fabricated by Applied Nanotools using e-beam lithography and reactive-ion etching (RIE). Figure 3.4 shows an SEM image of the fabricated demultiplexer (a) along with detailed views of the deflector (b), the input taper (c) and the output waveguides (d).



**Figure 3.4:** a) SEM image of the fabricated curved waveguide grating demultiplexer. b) Close view of the deflector region showing the grating, the SWG slab and the GRIN adaptation region. c) SEM image of the input adaptation taper. d) Detail of the output waveguides.

The fabricated device was characterized by normalizing the transmitted power to that of a reference waveguide. To ensure that the same power is injected into the reference waveguide and the demultiplexer, a  $1 \times 2$  MMI power splitter was used [see Fig. 3.4(a)]. The resulting transmittance is shown in Fig. 3.5. The measured spectra exhibit a wavelength shift with respect to the simulation (grey shaded curves), the latter are shifted by 8.5 nm in Fig. 3.5. This wavelength shift is attributed to inherent fabrication variability, which can be compensated via active tuning, as we show in the following section.

We measured an insertion loss as low as  $1.1 \pm 0.36$  dB. This is a record low loss for demultiplexers in fully etched 220-nm-SOI [Melati2019; Melati2022; Tondini2017; Zou2017]. The crosstalk is less than  $-25$  dB and the mean 3-dB cumulative crosstalk, as defined in [Stanton2017], is  $-23$  dB, i.e. the lowest value yet reported for a curved waveguide demultiplexer and comparable to state of the art demultiplexer devices in SOI. The best performing AWG demultiplexers implemented in fully etched thin silicon platforms achieve insertion losses of 2.9 dB and crosstalk higher than  $-24$  dB [Tondini2017], while the best CWG demultiplexer prior to this work has an insertion loss higher than 3 dB and crosstalk higher than  $-25$  dB [Bock2012]. Table 3.3 shows a summary comparison of the device performance reported in this work with selected recently published C-band devices implemented on a similar platform.



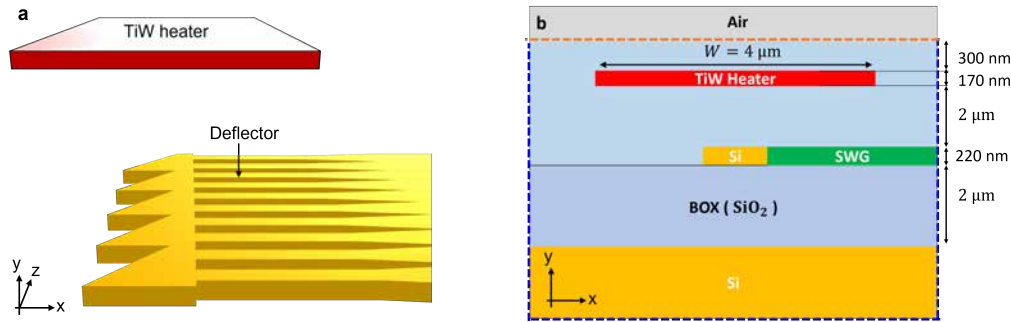
**Figure 3.5:** Measured transmission spectra of the fabricated demultiplexer. The simulated spectra (shifted 8.5 nm) are also included as a grey dotted curves for reference.

Ref.	Type	# Channels	Channel Sep.	Insertion Loss	Crosstalk
[Melati2022]	EG	4	6.4 nm	~ 2 dB	~ -20 dB
[Tondini2017]	AWG	6	6.4 nm	2.9 dB	-24.4 dB
[Bock2012]	CWG	21	15 nm	> 3 dB	-25 dB
<i>This Work</i>	CWG	8	10 nm	1.1 dB	-24 dB

**Table 3.3:** Performance comparison of the demultiplexer reported here with selected recently published experimental multi-channel wavelength demultiplexers for the C band implemented in a single etch 220-nm-thick SOI platform.

### 3.5 Thermal tuning of curved waveguide demultiplexers

Practical wavelength demultiplexers require precise alignment of the spectral response to a reference grid (wavelength registration). This is particularly challenging to achieve in a thin SOI platform as the common fabrication variations typically induce wavelength shifts of several nanometres in demultiplexer spectral response. Moreover, the silicon refractive index is strongly dependent on the temperature, hence the spectral response shifts with the ambient temperature. For coarse wavelength demultiplexers, wavelength miss-alignment can be circumvented by using a wide channel passband and preferably flattop response. This assures that the nominal wavelength remains within the pass-band of the channel as the spectral response shifts due to fabrication and temperature variations. This strategy, albeit being effective for coarse WDM systems, does not apply for dense wavelength division multiplexing (DWDM) using densely spaced and narrow-bandwidth channels. In this scenario, active tuning becomes mandatory. In platforms where silicon is used as guiding material such in SOI, tuning is typically accomplished by using the thermo-optic effect exhibited by the silicon.



**Figure 3.6:** a) Waveguide heating architecture used in this Thesis to tune the CWG spectral response. b) Cross-section of the simplified 2D model used for the heat transfer simulation. The dashed lines represent the simulation region boundaries. Blue dashed lines correspond to a constant temperature boundary condition while the orange dashed line corresponds to a convective boundary condition.

We use thermal tuning to control the CWG demultiplexer spectral response. To do so, a titanium-tungsten alloy (TiW) heater is placed on top of the curved waveguide grating, as shown in Fig. 3.6(a). This geometry can be readily fabricated by the open-access platforms, e.g. Applied Nanotools [Applied Nanotools Inc2022]. This strategy requires heating only of a small region and permits simultaneous tuning of all channels with a single heating element. As a result, a high tuning efficiency ( $\sim 43$  nm/W) is achieved compared to previous work ( $\sim 7$  nm/W [Tondini2017]) with a simple architecture.

#### 3.5.1 Optical model

The CWG tuning is achieved by using the thermo-optic effect present in the silicon ( $\partial n_{\text{Si}}/\partial T = 1.86 \times 10^{-4}$  RIU/K). A temperature change is translated into a variation in the deflector grating effective index  $n_{\text{eff}}^{\text{FB}}$  and the FPR slab effective index  $n_{\text{FPR}}$ . As a result, the diffraction angle  $\theta$  changes with temperature, effectively tuning the demultiplexer wavelength response. The angular temperature sensitivity  $S_T$  is readily

obtained from expression (3.1):

$$S_T = \frac{\partial \theta}{\partial T} \approx \frac{1}{n_{\text{FPR}} \cos \theta} \left( \frac{\partial n_{\text{eff}}^{\text{FB}}}{\partial T} - \frac{\partial n_{\text{FPR}}}{\partial T} \sin \theta \right). \quad (3.10)$$

ince the heater is positioned on top of the waveguide grating, the heating is primarily localized in this region. Consequently, only the variation of the waveguide grating effective index are considered, while the FPR slab contribution can be neglected. Furthermore, due to the strong confinement in SOI platform, we assume that  $\frac{\partial n_{\text{eff}}^{\text{FB}}}{\partial T} \approx \frac{\partial n_{\text{Si}}}{\partial T}$ , yielding the following simplified expression for the temperature sensitivity:

$$S_T = \frac{\partial \theta}{\partial T} = \frac{1}{n_{\text{FPR}} \cos \theta} \left( \frac{\partial n_{\text{Si}}}{\partial T} \right). \quad (3.11)$$

We compute the wavelength shift  $\delta \lambda$  produced for a temperature change  $\Delta T$  by using  $S_T$  and the angular dispersion  $D$  (see Eq. (3.4)), as:

$$\delta \lambda = -\frac{S_T}{D} \Delta T = -\frac{\partial n_{\text{Si}}}{\partial T} \frac{\lambda}{n_{g,\text{FPR}} \sin \theta - n_{g,\text{FB}}} \Delta T. \quad (3.12)$$

#### 3.5.2 Thermal model

The heater thermal operation can be modelled using a linear relation that links the dissipated power in the heater and the temperature change  $\Delta T$  in the grating waveguide:

$$\Delta T = \frac{p}{\sigma_{\text{Th}}}, \quad (3.13)$$

where  $p$  is the power dissipated by the heater per unit length and  $\sigma_{\text{Th}}$  is the proportionality factor that includes the thermal dynamics of the system. Since  $\sigma_{\text{Th}}$  has thermal conductivity dimension and is specific to the platform, we will refer to  $\sigma_{\text{Th}}$  as the thermal conductivity of the platform. This parameter can be readily obtained by means of heat transfer analysis. In this thesis, we used the the commercial software COMSOL Multiphysics® which implements the finite element method to solve the heat transfer problem.

Finally, by combining equations (3.12) and (3.13), we obtain the tuning efficiency  $\eta_{\text{Th}}$  of the demultiplexer defined as the wavelength shift  $\Delta \lambda$  induced per unit of electrical power injected into the heater as:

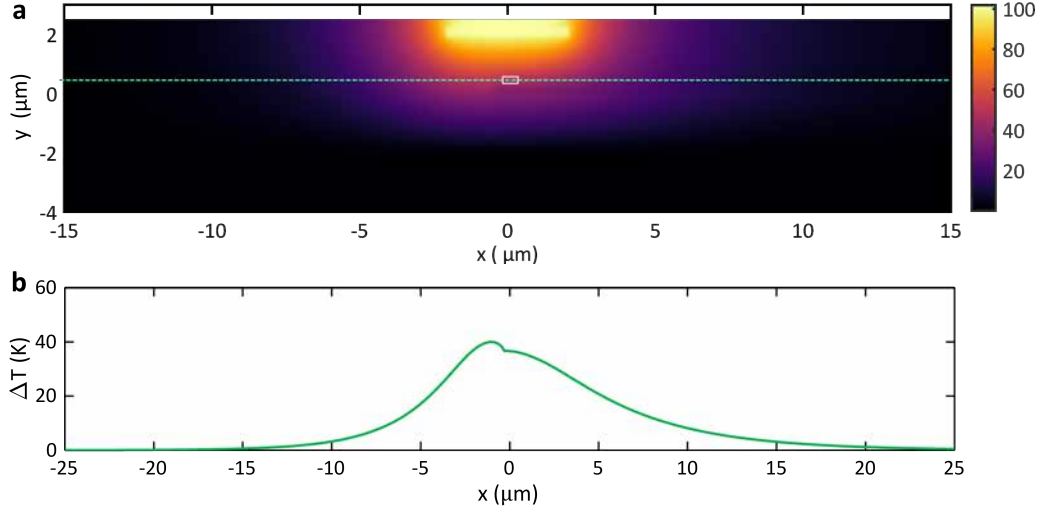
$$\eta_{\text{Th}} = \frac{\Delta \lambda}{P} = \frac{\partial \lambda}{\partial T} \frac{1}{\sigma_{\text{Th}} L}, \quad (3.14)$$

where  $P$  is the electrical power injected into the heater and  $L$  is the deflector length.

#### 3.5.3 Heat transfer analysis

Figure 3.6(b) shows the 2D geometry used for the heat transfer simulation. The SWG region was homogenized by averaging the thermal conductivities of silicon and SiO<sub>2</sub>.

For the lateral and bottom edges of the simulated structure, the ambient temperature of  $T_0 = 293.15$  K is applied as a boundary condition. For the top edge, the air is assumed to extend infinitely and a convective boundary condition is used. A convective coefficient of  $h = 21.7 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  was used [Tong2011]. Since steady-state solution is pursued, the materials can be fully described by their thermal conductivities:  $\kappa_{Si} = 130 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,  $\kappa_{SiO_2} = 1.4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,  $\kappa_{TiW} = 174 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  and  $\kappa_{SWG} = (\kappa_{Si} + \kappa_{SiO_2})/2$ , for an SWG duty cycle of 0.5. The heater is modelled as a constant heat source.



**Figure 3.7:** a) Temperature distribution within a cross-section of the geometry considered. The waveguide grating location is indicated by the white rectangle b) Temperature along the dashed line shown in a).

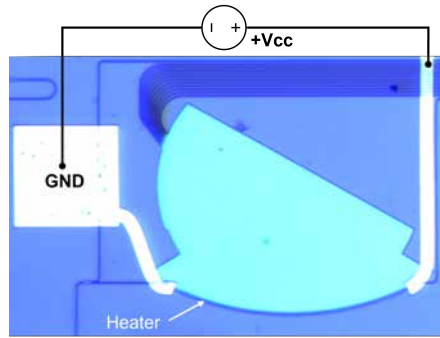
Figure 3.7(a) shows the calculated temperature change when a dissipated power per unit length in the heater is  $0.35 \text{ mW}/\mu\text{m}$ . The temperature change along the green dashed line of Fig. 3.7(a) is shown in Fig. 3.7(b). At the centre of the grating waveguide, a 40 K temperature increment is induced. This results on a platform thermal conductivity  $\sigma_{Th}$  of  $8.85 \times 10^{-3} \text{ mWK}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ . For the demultiplexer reported in the previous section ( $D = 1.6 \times 10^{-3} \text{ rad/nm}$ ), the calculated thermal efficiency is  $\eta_{Th} = 35 \text{ nm/W}$ .

### 3.5.4 Experimental results

The tunable demultiplexer was fabricated using the tri-layer metallization process at Applied Nanotools [Applied Nanotools Inc2022]. Figure 3.8 shows an optical microscope photograph of the fabricated device.

To characterize the device, we performed several optical transmission spectra measurements for different heater powers ranging from 0 mW to 140 mW. The measured spectra for 0 mW and 140 mW are shown in Fig. 3.9. As the device is heated, the transmittance spectrum shifts with negligible loss penalty or passband distortions. The central wavelength shift and excess loss as a function of the power applied are shown in Fig. 3.10. The measured tuning efficiency is of  $\eta_{Th} = 42.9 \text{ nm/W}$  which is slightly higher than the predicted ( $35 \text{ nm/W}$ ). We believe that this discrepancy is due to not

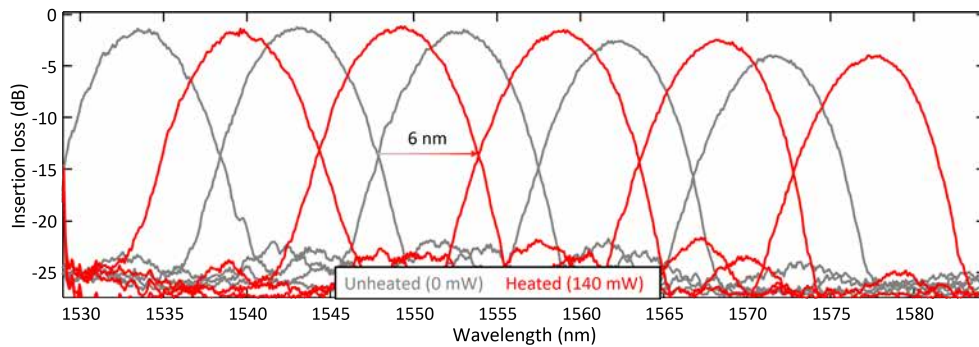




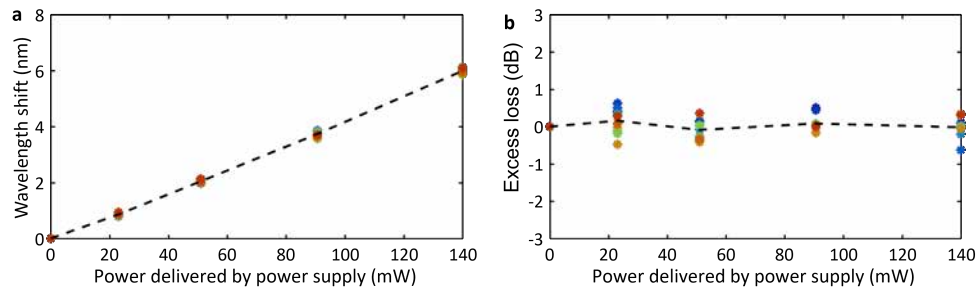
**Figure 3.8:** Optical microscope image showing a fabricated CWG demultiplexer with a TiW heater and the electrical connections.

considering the temperature variation in the FPR slab. This measured tuning efficiency is a record value for SOI-based demultiplexers. The highest efficiency value reported to date, to the best of our knowledge, is 7 nm/W achieved by Tondini *et al.* using an AWG [Tondini2017]. The thermal efficiency can be further increased up to a factor of  $\sim 20$  by applying thermal insulation techniques such as local removal of substrate silicon [Masood2013].

A journal article on the results presented in this section is currently under preparation.



**Figure 3.9:** Measured transmission spectra of the fabricated demultiplexer for two values of electrical power applied to the heater: 0 mW (grey) and 140 mW (red).

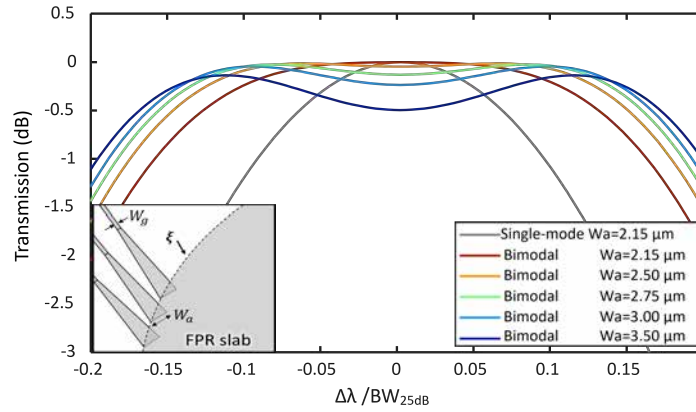


**Figure 3.10:** a) Central wavelength shift and b) excess loss introduced by the heating versus the power delivered to the heater. Data points indicate measurements for different channels while the dashed black lines represent the channel-averaged data.

### 3.6 Flat-top design

Demultiplexers with flattop passband are often preferred since this characteristic permits relaxing the requirements on the laser wavelength control [Cheben2006]. Using multimode output waveguides is a simple, yet effective, technique to achieve flattop passband AWG demultiplexers without substantial excess loss [Smit1996].

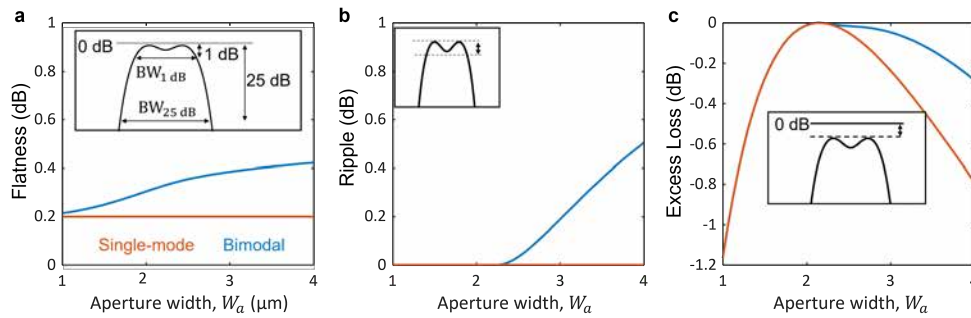
Here, we use bimodal output waveguides to implement a flattened passband. We targeted the same design specifications as in section 3.4. The output waveguides width,  $W_g$ , was set to 700 nm, supporting the two lowest order TE modes. A Gaussian field with  $0.75 \mu\text{m}$  MFR, i.e. the same as the design of section 3.4, is assumed at the focal curve. Figure 3.11 shows the passband shape for different values of the receiver aperture width,  $W_a$ , when i) coupling to the two lowest order modes is considered (colours) and ii) only the fundamental mode is considered (grey). It is observed that the flattening of the response as we transition from the single-mode (grey) to the bi-modal regime (red), with  $W_a$  determining the passband flatness, ripple and loss.



**Figure 3.11:** Central channel passband for single-mode (grey) and bimodal outputs (coloured) for various widths of the receiver waveguide aperture  $W_a$  (as shown in the inset).

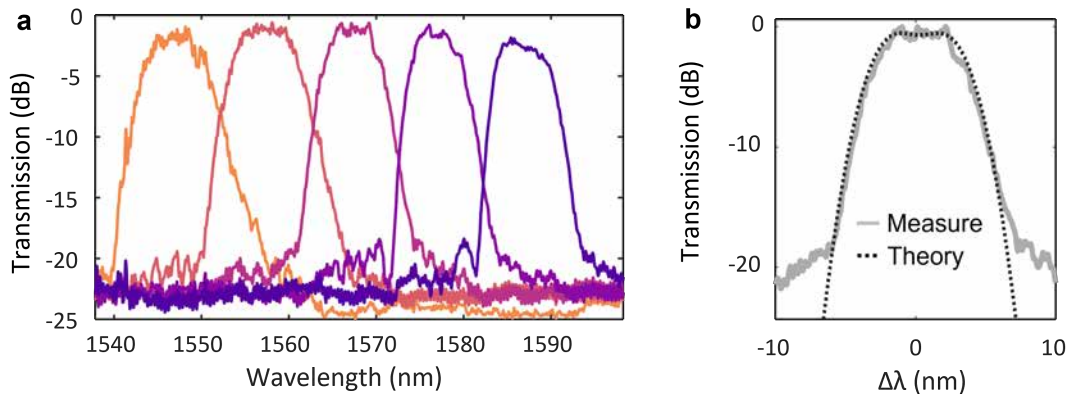
To further investigate the influence of the aperture width on the passband shape, we used the ratio of the 1-dB and the 25-dB bandwidth to quantify the response flatness  $F = BW_{1\text{dB}}/BW_{25\text{dB}}$  [Fondeur2004]. Figure 3.12(a) shows the calculated flatness of the response as the aperture width  $W_a$  is varied. The ripple and excess loss are shown in Fig. 3.12(b) and Fig. 3.12(c), respectively. The corresponding curves for the single-mode case were also included for reference (orange curves). For the bimodal receiver waveguides (blue curves), increasing the width  $W_a$  increases the flatness at the expense of a slight rise in the ripple and excess loss. Increasing  $W_a$  also requires increasing the waveguides separation  $W_s$  to limit crosstalk penalty. This also results in a larger device footprint as the curvature radius  $R$  is increased for the same channel separation. We set  $W_a$  to  $2.75 \mu\text{m}$  which achieves a good balance between enhanced flatness, reduced ripple ( $< 0.1 \text{ dB}$ ), and low excess loss ( $< 0.1 \text{ dB}$ ) while maintaining a compact footprint ( $W_s = 3.63 \mu\text{m}$  and  $R = 230 \mu\text{m}$ ).

The demultiplexer with flattened response was fabricated and characterized. The measured spectra are shown in Fig. 3.13(a). The experimental losses range from 1.2 dB to 2 dB and the crosstalk is lower than  $-20 \text{ dB}$  for all channels. The measured passband



**Figure 3.12:** CWG passband characteristics for a design with bimodal output (orange) and a single-mode output (grey). a) Flatness, b) ripple and c) loss for a 0.75- $\mu\text{m}$ -MFR Gaussian field at the Rowland circle.

shape is in a good agreement with the theoretical flattop response, as shown in Fig. 3.13(b).



**Figure 3.13:** a) Measured spectra for the CWG demultiplexer with a flattop passband. b) Central channel passband (measurement and theory).

### 3.7 Conclusions

We have demonstrated that curved waveguide grating demultiplexers can be implemented with insertion loss as low as 1 dB in a thin-SOI platform making them a realistic alternative to conventional demultiplexing architectures. The low-loss was achieved by enforcing on the deflector the single-beam condition presented in the previous chapter. We have also proposed an efficient yet simple tuning strategy for CWG demultiplexers by locally heating the deflector region. We demonstrated a record tuning efficiency of 42.9 nm/W, unprecedented in SOI demultiplexers. Finally, we demonstrated that this architecture can achieve a low-loss flattop response by using bimodal outputs. We believe that this work paves the way towards the wider adoption of CWG demultiplexers in integrated photonics.

## 3.8 References

- [Applied Nanotools Inc2022] Applied Nanotools Inc. *Applied Nanotools Inc.* 2022. URL: <https://www.appliednt.com/> (visited on 03/29/2022).
- [Bock2008] P. J. Bock, P. Cheben, A. Delâge, J. H. Schmid, D.-X. Xu, S. Janz, and T. J. Hall. “Demultiplexer with Blazed Waveguide Sidewall Grating and Sub-Wavelength Grating Structure”. In: *Opt. Express* 16.22 (Oct. 27, 2008), p. 17616. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.16.017616](https://doi.org/10.1364/OE.16.017616).
- [Bock2012] P. J. Bock, P. Cheben, J. H. Schmid, A. V. Velasco, A. Delâge, S. Janz, D.-X. Xu, J. Lapointe, T. J. Hall, and M. L. Calvo. “Demonstration of a Curved Sidewall Grating Demultiplexer on Silicon”. In: *Opt. Express* 20.18 (Aug. 27, 2012), p. 19882. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.20.019882](https://doi.org/10.1364/OE.20.019882).
- [Cheben2006] P. Cheben, S. Janz, D.-X. Xu, B. Lamontagne, A. Delage, and S. Tanev. “A Broad-Band Waveguide Grating Coupler with a Subwavelength Grating Mirror”. In: *IEEE Photonics Technology Letters* 18.1 (Jan. 2006), pp. 13–15. ISSN: 1941-0174. DOI: [10.1109/LPT.2005.860037](https://doi.org/10.1109/LPT.2005.860037).
- [Fondeur2004] B. Fondeur, A. Sala, H. Yamada, R. Brainard, E. Egan, S. Thekdi, N. Gopinathan, D. Nakamoto, and A. Vaidyanathan. “Ultrawide AWG With Hyper-Gaussian Profile”. In: *IEEE Photon. Technol. Lett.* 16.12 (Dec. 2004), pp. 2628–2630. ISSN: 1041-1135. DOI: [10.1109/LPT.2004.836746](https://doi.org/10.1109/LPT.2004.836746).
- [Hadij-ElHouati2021] A. Hadij-ElHouati, A. Ortega-Mo ux, J. G. Wangüemert-Pérez, R. Halir, S. Wang, J. H. Schmid, P. Cheben, and I. Molina-Fernández. “Low-Loss off-Axis Curved Waveguide Grating Demultiplexer”. In: *Opt. Lett.* 46.19 (Oct. 1, 2021), p. 4821. ISSN: 0146-9592, 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.434294](https://doi.org/10.1364/OL.434294).
- [Hao2006] Y. Hao, Y. Wu, J. Yang, X. Jiang, and M. Wang. “Novel Dispersive and Focusing Device Configuration Based on Curved Waveguide Grating (CWG)”. In: *Opt. Express* 14.19 (2006), p. 8630. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.14.008630](https://doi.org/10.1364/OE.14.008630).
- [Masood2013] A. Masood, M. Pantouvaki, G. Lepage, P. Verheyen, J. Van Campenhout, P. Absil, D. Van Thourhout, and W. Bogaerts. “Comparison of Heater Architectures for Thermal Control of Silicon Photonic Circuits”. In: *10th International Conference on Group IV Photonics*. 10th International Conference on Group IV Photonics. Aug. 2013, pp. 83–84. DOI: [10.1109/Group4.2013.6644437](https://doi.org/10.1109/Group4.2013.6644437).
- [Melati2019] D. Melati, P. G. Verly, A. Delâge, S. Wang, J. Lapointe, P. Cheben, J. H. Schmid, S. Janz, and D.-X. Xu. “Compact and Low Crosstalk Echelle Grating Demultiplexer on Silicon-On-Insulator Technology”. In: *Electronics* 8.6 (June 18, 2019), p. 687. ISSN: 2079-9292. DOI: [10.3390/electronics8060687](https://doi.org/10.3390/electronics8060687).
- [Melati2022] D. Melati, D. Melati, D.-X. Xu, R. Cheriton, S. Wang, M. Vachon, J. H. Schmid, P. Cheben, and S. Janz. “Athermal Echelle Grating and Tunable Echelle Grating Demultiplexers Using a Mach-Zehnder Interferometer Launch Structure”. In: *Opt. Express, OE* 30.9 (Apr. 25, 2022), pp. 14202–14217. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.453273](https://doi.org/10.1364/OE.453273).
- [Orfanidis2002] S. J. Orfanidis. “Diffraction – Plane-Wave Spectrum”. In: *Electromagnetic Waves and Antennas*. Rutgers University New Brunswick, NJ, 2002.
- [Potton2004] R. J. Potton. “Reciprocity in Optics”. In: *Rep. Prog. Phys.* 67.5 (May 1, 2004), pp. 717–754. ISSN: 0034-4885, 1361-6633. DOI: [10.1088/0034-4885/67/5/R03](https://doi.org/10.1088/0034-4885/67/5/R03).

- [Smit1996] M. Smit and C. Van Dam. “PHASAR-based WDM-devices: Principles, Design and Applications”. In: *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* 2.2 (June 1996), pp. 236–250. ISSN: 1077260X. DOI: [10.1109/2944.577370](https://doi.org/10.1109/2944.577370).
- [Stanton2017] E. J. Stanton, N. Volet, and J. E. Bowers. “Low-Loss Demonstration and Refined Characterization of Silicon Arrayed Waveguide Gratings in the near-Infrared”. In: *Opt. Express* 25.24 (Nov. 27, 2017), p. 30651. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.25.030651](https://doi.org/10.1364/OE.25.030651).
- [Tondini2017] S. Tondini, C. Castellán, M. Mancinelli, C. Kopp, and L. Pavesi. “Methods for Low Crosstalk and Wavelength Tunability in Arrayed-Waveguide Grating for On-Silicon Optical Network”. In: *J. Lightwave Technol.* 35.23 (Dec. 1, 2017), pp. 5134–5141. ISSN: 0733-8724, 1558-2213. DOI: [10.1109/JLT.2017.2768161](https://doi.org/10.1109/JLT.2017.2768161).
- [Tong2011] X. C. Tong. *Advanced Materials for Thermal Management of Electronic Packaging*. Vol. 30. Springer Series in Advanced Microelectronics. New York, NY: Springer New York, 2011. ISBN: 978-1-4419-7758-8. DOI: [10.1007/978-1-4419-7759-5](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7759-5).
- [Zou2017] J. Zou, Z. Le, J. Hu, and J.-J. He. “Performance Improvement for Silicon-Based Arrayed Waveguide Grating Router”. In: *Opt. Express* 25.9 (May 1, 2017), p. 9963. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.25.009963](https://doi.org/10.1364/OE.25.009963).



## 4 Distributed Bragg deflector as antenna feeder

Large area on-chip optical antennas that can radiate a free-space steerable off-chip beam are of great interest for many applications, including LIDAR, free-space communications, and optical coherence tomography (OCT) [Vermeulen2018]. Implementing such antennas in SOI generally requires OPAs comprising several diffractive gratings, each fed individually and with a distinct phase controlled by a phase shifter. The steering circuit and feeding network typically consume a large chip area. Two architectures are predominant: 2D arrays of compact gratings, and 1D arrays of long gratings. The latter is often preferred, as it leverages the inherent wavelength dependent diffraction for the gratings, hence it requires considerably fewer phase shifters and a smaller feeding network. Even in the case of 1D arrays, the array occupied by the feed network consumes a large portion of the total circuit footprint. Moreover, the spacing among consecutive linear grating antennas forming the 1D array should be kept below half a wavelength to suppress grating lobes. Nonetheless, this is rarely possible in 1D arrays due to the onset of coupling among neighbouring antennas when the spacing is reduced.

A novel and least explored alternative to produce steerable OPAs is to use a single large-area surface grating fed by a steerable beam propagating in a slab waveguide, i.e. with 1D vertical confinement. Scanning in the elevation angle  $\theta$  (see Fig. 4.1) is achieved mainly by using the intrinsic dependence of the grating radiation angle with wavelength, while scanning in the azimuthal angle  $\phi$  (see Fig. 4.1) can be obtained by adjusting the in-plane propagation angle of the beam in the FPR. As shown in chapter 3, this can be readily achieved by using a thermally tunable distributed Bragg deflector. This concept is visualised in Fig. 4.1. This comparatively simple OPA architecture leverages a combination of wavelength and thermo-optical tuning to provide 2D steering of highly collimated beams without grating lobes while using a single thermal heater.

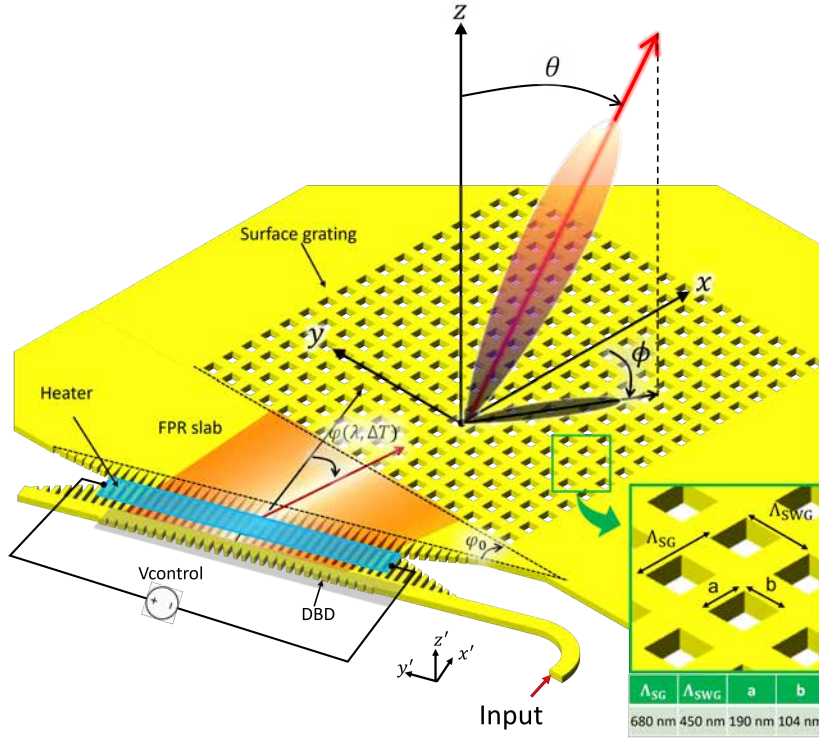
### 4.1 Working principle and theoretical analysis

Figure 4.1 shows the geometry of a typical antenna fed with a distributed Bragg deflector. The beam coupled by a deflector to a slab waveguide is used to feed an off-chip surface grating coupler. The incidence angle  $\varphi(\lambda, \Delta T) - \varphi_0$ <sup>1</sup> of the deflector beam on the surface grating can be readily controlled by temperature variation  $\Delta T$  induced by the heater positioned on top of the deflector. Thus, bidimensional beam steering is achieved by the temperature and wavelength control. The direction  $(\theta, \phi)$  at which the off-chip beam is radiated as a function of the wavelength and temperature can be determined according to the following considerations: First, the beam propagation angle within the silicon slab  $\varphi(\lambda, \Delta T)$  is found by using the grating equation:

$$\varphi(\lambda, \Delta T) = \arcsin \frac{n_{\text{DBD}}(\lambda, \Delta T) - \lambda / \Lambda_{\text{DBD}}}{n_s}, \quad (4.1)$$

---

<sup>1</sup>In previous chapters, the direction of the beam generated by DBD was referred to as  $\theta$ , but in this chapter we will refer to it as  $\varphi$  to avoid confusion with the off-chip beam elevation angle  $\theta$ .



**Figure 4.1:** Schematic of a surface grating coupler fed by a distributed Bragg deflector.

where  $n_{\text{DBD}}$  is Floquet-Bloch mode index of the distributed Bragg deflector,  $\Lambda_{\text{DBD}}$  is the periodicity and  $n_s$  is the effective index of the silicon slab mode.

The incidence angle of the diffracting beam on the surface grating is given by the difference  $\varphi(\lambda, \Delta T) - \varphi_0$ . The incidence angle is  $0^\circ$  for the central wavelength  $\lambda_0 = 1550$  nm.

Since the phase variation along the  $x$ -direction must be conserved at the input interface of the grating, the  $x$ -component of the wave-vector of the beam propagating in the silicon slab should match the  $x$ -component of the wave-vector of the beam propagating in the surface grating. From this assumption, we can readily find that the wave-vector  $\vec{k}_{-1} = k_x \hat{\mathbf{a}}_x + k_y \hat{\mathbf{a}}_y$  corresponding to the diffraction order -1 within the surface grating has the following components:

$$\frac{k_y}{k_0} = n_s \sin(\varphi(\lambda, \Delta T) - \varphi_0), \quad (4.2)$$

$$\frac{k_x}{k_0} = \sqrt{n_{\text{SG}}^2 - (k_y/k_0)^2} - \frac{\lambda}{\Lambda_{\text{SG}}}, \quad (4.3)$$

where  $\Lambda_{\text{SG}}$  is the surface grating period along  $x$ -direction and  $n_{\text{SG}}$  is the surface grating Floquet-Bloch mode effective index, which we assume to be isotropic, i.e. identical for all propagation directions.

By applying phase matching condition with air propagating waves, we calculate

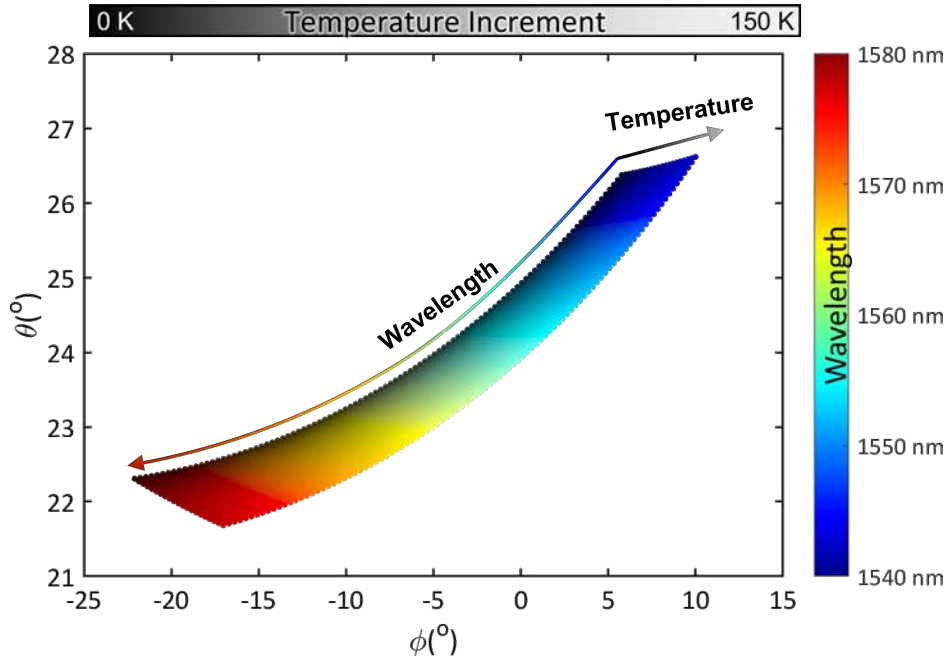


the propagation direction angles  $(\theta, \phi)$  of the beams radiated from the surface grating :

$$\theta = \arcsin \frac{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}}{k_0}, \quad (4.4)$$

$$\phi = \arctan \frac{k_y}{k_x}. \quad (4.5)$$

Equations (4.4) and (4.5) were used to estimate the steering range for the system shown in 4.1. The system comprises a deflector built with the same diffractive element library used for the demultiplexer reported in section 3.4, and a weak surface grating implemented by lateral SWG metamaterial following the strategy outlined in [Halir2010]. The surface grating geometry is shown in Fig. 4.1.

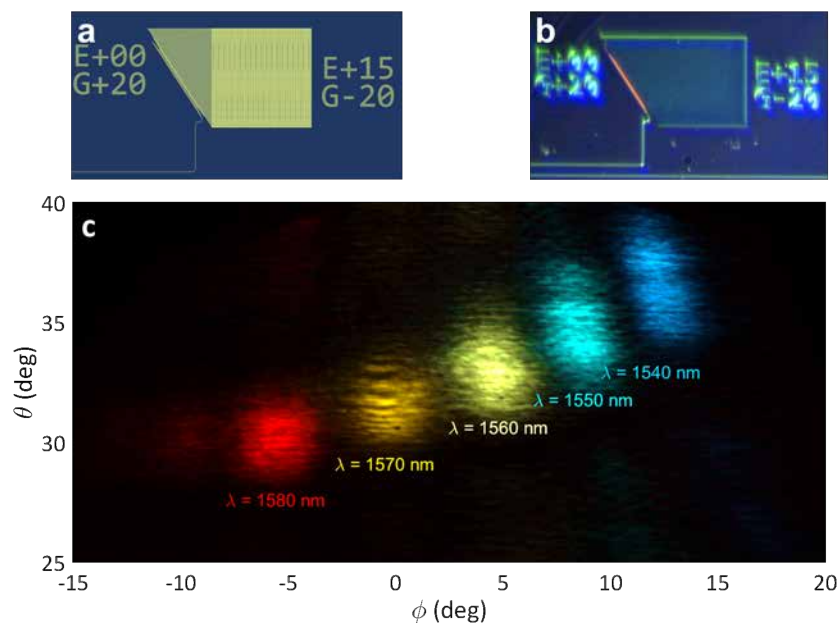


**Figure 4.2:** Theoretical steering range of the deflector-fed surface grating shown in Fig. 4.1. Each point represents a possible radiation direction. The colour indicates the wavelength and the brightness the temperature required to radiate the beam in a specific direction.

The distributed Bragg deflector is modelled by its effective index ( $n_{\text{DBD}} = 2.55$  @  $\lambda = 1550$  nm), its variation with the wavelength ( $\partial n_{\text{DBD}}/\partial \lambda = -0.8 \mu\text{m}^{-1}$ ) and the grating pitch ( $\Lambda_{\text{DBD}} = 375$  nm). The surface grating operation, likewise, is described by its effective index ( $n_{\text{SG}} = 2.7$  @  $\lambda = 1550$  nm), its variation with the wavelength ( $\partial n_{\text{SG}}/\partial \lambda = -0.6 \mu\text{m}^{-1}$ ) and the grating pitch along the  $x$ -direction ( $\Lambda_{\text{SG}} = 680$  nm). By using these parameters in equations (4.4) and (4.5), and considering a wavelength tuning ranging from 1540 nm to 1580 nm and a temperature increment from 0 K to 150 K, we calculate the beam radiation direction direction. The results are shown in Fig. 4.2), achieving an angular span of approximately  $20^\circ \times 5^\circ$ .

## 4.2 Experimental verification

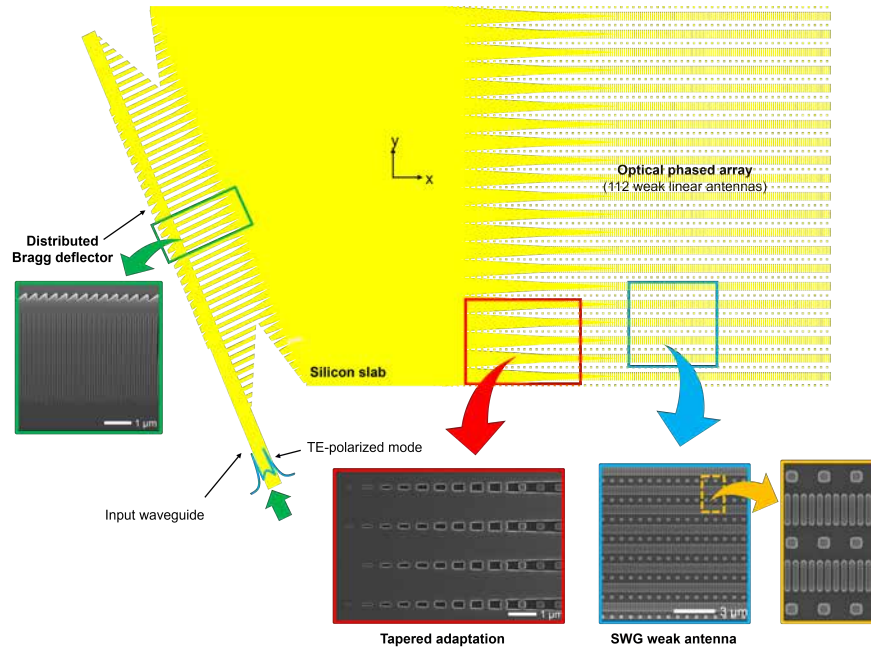
We fabricated a proof-of-concept device to assess the deflector-fed surface grating feeding (see Fig. 4.1). The full device on the GDS layout as submitted is shown in Fig. 4.3(a) and the optical microscope image of the fabricated device is shown in Fig. 4.3(b). No heater was included so the temperature steering was not tested while the wavelength steering capability was assessed. The far-field light distribution was measured with an infrared camera and lens system, as described in [Ginel-Moreno2021]. This specific measurement was carried out by Mr. Pablo Ginel-Moreno, PhD candidate at our group. The measured far-field patterns are shown in Fig. 4.3(c) for five different wavelengths. Wavelength-induced beam steering is clearly observed.



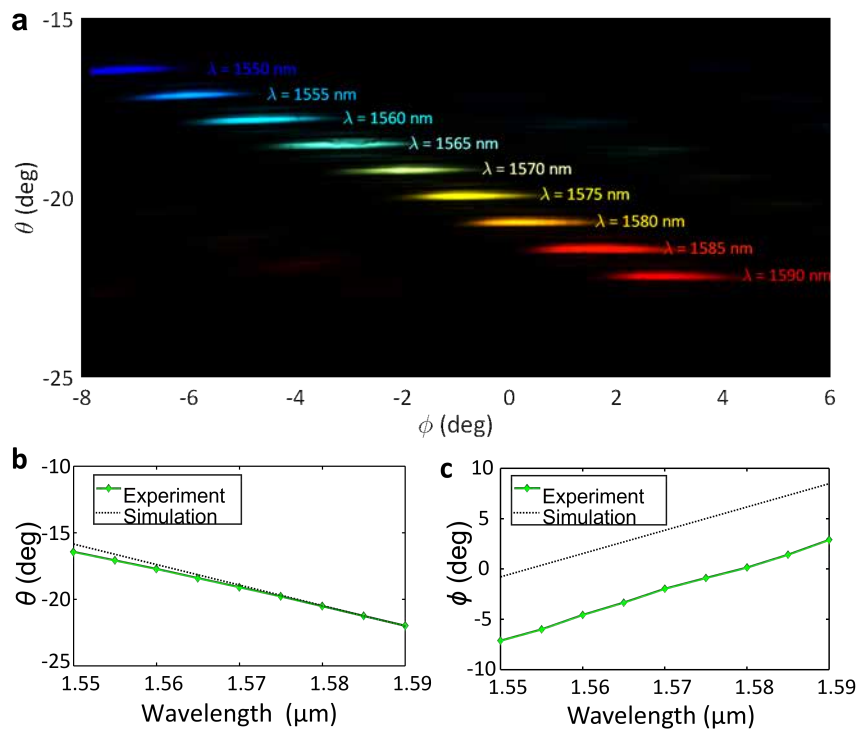
**Figure 4.3:** a) Close view of the deflector-fed surface grating in the GDS layout file sent to the foundry. b) Optical microscope image of the fabricated device. c) Measured far-field intensity distribution as a function of  $\theta$  and  $\phi$  for five wavelengths ranging from 1540 nm to 1580 nm

Further assessment of this proposed feeding scheme will be conducted in our research group as a part of PhD research of Pablo Ginel-Moreno, as a part of the investigation of an alternative architecture in which the surface grating is substituted by an array of tightly spaced weak linear antennas, as shown in Fig. 4.4. The weak linear antennas comprise an SWG waveguide laterally loaded with diffractive silicon blocks [Ginel-Moreno2020; Ginel-Moreno2021]. Here we only briefly introduce the results of this architecture as we consider that it gives additional experimental validation of the original technique proposed in this work. For a detailed description, we refer the reader to our recent publication. [Ginel-Moreno2022]

The far field measurement results are shown Fig. 4.5. A good agreement between theory and experiment is observed, demonstrating the feasibility of the deflector-fed antenna architecture. We believe that the results presented in this chapter are the basis for a new type of steerable antenna leveraging distributed Bragg deflectors for both antenna feeding and beam steering functions.



**Figure 4.4:** Top-view schematic of a deflector-fed OPA formed by an array of weak linear antennas. The insets show SEM images of different parts of the fabricated device.



**Figure 4.5:** a) Measured far-field distribution as a function of  $\phi$  and  $\theta$  for different wavelengths ranging from 1540 nm to 1590 nm, for the weak antenna architecture shown in Fig. 4.4. b) Measured vertical emission angle  $\theta$  and c) azimuthal emission  $\phi$  angle as a function of the wavelength. Simulation results are included for comparison.

### 4.3 References

- [Ginel-Moreno2020] P. Ginel-Moreno, D. Pereira-Martín, A. Hadij-ElHouati, W. N. Ye, D. Melati, D.-X. Xu, S. Janz, A. Ortega-Moñux, J. G. Wangüemert-Pérez, R. Halir, Í. Molina-Fernández, J. H. Schmid, and P. Cheben. “Highly Efficient Optical Antenna with Small Beam Divergence in Silicon Waveguides”. In: *Opt. Lett.* 45.20 (Oct. 15, 2020), p. 5668. ISSN: 0146-9592, 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.404012](https://doi.org/10.1364/OL.404012).
- [Ginel-Moreno2021] P. Ginel-Moreno, A. Sánchez-Postigo, J. de-Oliva-Rubio, A. Hadij-ElHouati, W. N. Ye, J. G. Wangüemert-Pérez, Í. Molina-Fernández, J. H. Schmid, P. Cheben, and A. Ortega-Moñux. “Millimeter-Long Metamaterial Surface-Emitting Antenna in the Silicon Photonics Platform”. In: *Opt. Lett., OL* 46.15 (Aug. 1, 2021), pp. 3733–3736. ISSN: 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.431983](https://doi.org/10.1364/OL.431983).
- [Ginel-Moreno2022] P. Ginel-Moreno, A. Hadij-ElHouati, A. Sánchez-Postigo, J. G. Wangüemert-Pérez, Í. Molina-Fernández, J. H. Schmid, P. Cheben, and A. Ortega-Moñux. “On-Chip Metamaterial Antenna Array with Distributed Bragg Deflector for Generation of Collimated Steerable Beams”. In: *Laser & Photonics Reviews* (July 3, 2022), p. 2200164. ISSN: 1863-8880, 1863-8899. DOI: [10.1002/lpor.202200164](https://doi.org/10.1002/lpor.202200164).
- [Halir2010] R. Halir, P. Cheben, J. H. Schmid, R. Ma, D. Bedard, S. Janz, D.-X. Xu, A. Densmore, J. Lapointe, and Í. Molina-Fernández. “Continuously Apodized Fiber-to-Chip Surface Grating Coupler with Refractive Index Engineered Subwavelength Structure”. In: *Opt. Lett.* 35.19 (Oct. 1, 2010), p. 3243. ISSN: 0146-9592, 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.35.003243](https://doi.org/10.1364/OL.35.003243).
- [Vermeulen2018] D. Vermeulen and C. V. Poulton. “Optical Interfaces for Silicon Photonic Circuits”. In: *Proc. IEEE* 106.12 (Dec. 2018), pp. 2270–2280. ISSN: 0018-9219, 1558-2256. DOI: [10.1109/JPROC.2018.2865725](https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2865725).

This Thesis aimed to develop practical low-loss DBD-based devices for the SOI platform. Previously published DBD based devices suffered significant losses that hindered their practical use. In this work, we identified the origin of these losses and successfully managed to mitigate them. In doing so, we have demonstrated several new devices with excellent performance beyond state-of-the-art.

First, we investigated, using Floquet-Bloch mode analysis, the origin of the high losses observed in previously reported deflector-based devices. We found that these losses are due to off-chip radiation coupling, governed by the phase-matching condition. As long as the latter is met, the off-chip radiation cannot be reduced below 1.8 dB, which is inadequate for most practical applications. We tackled this problem at its root and proposed frustrating the phase-matching by imposing the single-beam condition. We demonstrated that when the latter holds, nearly lossless performance can be achieved. Based on this fundamental principle, a DBD-based beam expander was designed, in which the off-chip radiation loss was reduced to an unprecedented level of 0.15 dB.

Second, we designed a low-loss DBD for application in a curved waveguide grating demultiplexer. Our experimental results show that this architecture is particularly advantageous for demultiplexers with an intermediate number of channels (8-32 channels at 5-20 nm spacing) as required in datacom applications. We demonstrated a coarse demultiplexer with eight channels spaced 10 nm and the central wavelength of 1550 nm. The experimental results showed low loss (1 dB) and crosstalk ( $-25$  dB) that exceed the state of the art. As a result, we demonstrated that the CWG demultiplexer is a competitive alternative to conventional multiplexing/demultiplexing devices such as AWGs or echelle gratings. A flattened-passband low-loss CWG demultiplexer was also demonstrated. The experimental results showed a significant flattening of the passband while maintaining low loss (1 – 2 dB) and low crosstalk ( $< -20$  dB).

A tunable variant of the low-loss CWG demultiplexer was proposed, designed and experimentally demonstrated. Tunability was implemented in CWGs by locally heating the waveguide grating. The fabricated CWG demultiplexer shows a tuning efficiency of 43 nm/W which is almost six times higher than the best values reported in the literature [Tondini2017]. Tunable CWGs in SOI not only consume less energy for the same spectral shift compared with conventional demultiplexers, but they do so with virtually no excess loss or degradation of the response shape. Overall, we believe that CWG demultiplexers can significantly impact future datacom transceiver designs.

Finally, this Thesis also explored the use of a deflector as an optical antenna feed element implemented by a large-area surface grating. In this configuration, the deflector not only allows low-loss and compact beam expansion but also enables efficient two-dimensional beam steering. By placing a heater on top of the deflector, the radiated beam can be steered by temperature and wavelength control, circumventing the need for dedicated phase shifters. In effect, the phase-shifting function is integrated directly into the deflector. Albeit the field of view achieved by this architecture is limited ( $\sim 20^\circ \times 5^\circ$ ), its simplicity, compactness and thermal efficiency make it particularly promising for applications with comparatively small steering range.

The work performed in this Thesis overcomes the main inconvenience that had limited a wider adoption of DBD-based devices, namely off-chip radiation loss. We hope that our work will ignite a renovated interest in this exciting device architecture and will usher in renowned research interests in this field, leading to new exciting applications.

### 5.1 References

- [Tondini2017] S. Tondini, C. Castellan, M. Mancinelli, C. Kopp, and L. Pavesi. “Methods for Low Crosstalk and Wavelength Tunability in Arrayed-Waveguide Grating for On-Silicon Optical Network”. In: *J. Lightwave Technol.* 35.23 (Dec. 1, 2017), pp. 5134–5141. ISSN: 0733-8724, 1558-2213. DOI: [10.1109/JLT.2017.2768161](https://doi.org/10.1109/JLT.2017.2768161).

## A.1 Distributed Bragg deflector coupler for on-chip shaping of optical beams

### Citation

A. Hadij-ElHouati et al. “Distributed Bragg Deflector Coupler for On-Chip Shaping of Optical Beams”. In: *Opt. Express* 27.23 (Nov. 11, 2019), pp. 33180–33193. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.27.033180](https://doi.org/10.1364/OE.27.033180)

### Abstract

In integrated optical circuits light typically travels in waveguides which provide both vertical and horizontal confinement, enabling efficient routing between different parts of the chip. However, for a variety of applications, including on-chip wireless communications, steerable phased arrays or free-space inspired integrated optics, optical beams that can freely propagate in the horizontal plane of a 2D slab waveguide are advantageous. Here we present a distributed Bragg deflector that enables well controlled coupling from a waveguide mode to such a 2D on-chip beam. The device consists of a channel waveguide and a slab waveguide region separated by a subwavelength meta-material spacer to prevent uncontrolled leakage of the guided mode. A blazed grating in the waveguide sidewall is used to gradually diffract light into the slab region. We develop a computationally efficient strategy for designing gratings that generate arbitrarily shaped beams. As a proof-of-concept we design, in the silicon-on-insulator platform, a compact  $\times 75$  Gaussian beam expander and a partial beam deflector. For the latter, we also demonstrate a prototype device with experimental results showing good agreement with our theoretical predictions. We also demonstrate via a rigorous simulation that two such couplers in a back-to-back configuration efficiently couple light, suggesting that these devices can be used as highly directive antennas in the chip plane.

### Full article

Full article is freely available online at <https://doi.org/10.1364/OE.27.033180>.





## **A.2 High-efficiency conversion from waveguide mode to an on-chip beam using a metamaterial engineered Bragg deflector**

### **Citation**

A. Hadij-ElHouati et al. “High-Efficiency Conversion from Waveguide Mode to on-Chip Beam Using a Metamaterial Engineered Bragg Deflector”. In: *Opt. Lett.* 46.10 (May 15, 2021), pp. 2409–2412. ISSN: 0146-9592, 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.420993](https://doi.org/10.1364/OL.420993)

### **Abstract**

Diffraction gratings that redirect light propagating in a channel waveguide to an on-chip slab are emerging as important building blocks in integrated photonics. Such distributed Bragg deflectors enable precise shaping of slab confined beams for a variety of applications, including wavelength multiplexing, optical phased array feeding, and coupling interfaces for on-chip point-to-point communications. However, these deflectors suffer from significant losses caused by off-chip radiation. In this Letter, we show, for the first time, to the best of our knowledge, that off-chip radiation can be dramatically reduced by using the single-beam phase matching condition and subwavelength metamaterial refractive index engineering. We present a deflector design with losses below 0.3 dB, opening a path toward new applications of distributed Bragg deflectors in integrated photonics.

### **Full article**

Full article is freely available online at <https://doi.org/10.1364/OL.420993>.



## A.3 Low-loss off-axis curved waveguide grating demultiplexer

### Citation

A. Hadij-ElHouati et al. “Low-Loss off-Axis Curved Waveguide Grating Demultiplexer”. In: *Opt. Lett.* 46.19 (Oct. 1, 2021), p. 4821. ISSN: 0146-9592, 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.434294](https://doi.org/10.1364/OL.434294)

### Abstract

Current optical communication systems rely on the use of wavelength division multiplexing (WDM) to keep up with the increasing data rate requirements. The wavelength demultiplexer is the key component to implement WDM systems. In this Letter, we design and experimentally demonstrate a demultiplexer based on a curved grating waveguide geometry that separates eight channels with a spacing of 10 nm (1249 GHz) around the central wavelength of 1550 nm. The fabricated device shows very low insertion loss (1 dB) and a crosstalk (XT) below  $-25$  dB. This device leverages metamaterial index engineering to implement the lateral cladding on one side of the waveguide. This makes it possible to design a waveguide grating with highly directional lateral emission by operating in a regime where diffraction into the silica upper cladding is frustrated, thus suppressing losses due to off-chip radiation.

### Full article

Full article is freely available online at <https://doi.org/10.1364/OL.434294>.



## **A.4 Low-loss off-axis curved waveguide grating demultiplexer: supplement**

### **Citation**

A. Hadij-ElHouati et al. "Supplementary Document for Low-loss off-Axis Curved Waveguide Grating Demultiplexer - 5394863.Pdf". In: (Sept. 24, 2021). DOI: [10.6084/m9.figshare.15820884.v2](https://doi.org/10.6084/m9.figshare.15820884.v2)

### **Full document**

Full article is freely available online at <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.15820884.v2>.





## B.1 Introducción

Esta tesis se centra en el estudio exhaustivo de los acopladores fotónicos integrados pertenecientes a la categoría de deflectores Bragg distribuidos [*distributed Bragg deflector (DBD)*] y su implementación en la plataforma de silicio sobre aislante [*silicon-on-insulator (SOI)*]. Este dispositivo convierte un modo de guía de ondas de canal en un haz confinado en una guíaonda de película ( *slab* ) utilizando una rejilla formada en el núcleo de la guía de ondas de canal. El DBD fue propuesto por primera vez por Stoll en 1978 [Stoll1978]. Stoll previó una multitud de aplicaciones de los DBD incluyendo la expansión del haz, el filtrado de la polarización, la división del haz y la modulación. Sin embargo, los DBDs han sufrido típicamente altas pérdidas de inserción que dificultan su uso en aplicaciones prácticas. En esta tesis, desarrollamos estrategias para reducir drásticamente el exceso de pérdidas y demostramos varios dispositivos de baja pérdida basados en DBD en la plataforma SOI.

En primer lugar, desarrollamos varias herramientas y metodologías para el análisis y el diseño eficientes de los dispositivos basados en DBD. A continuación, utilizando estas nuevas herramientas, descubrimos que la radiación fuera del chip era el principal factor responsable del exceso de pérdidas observado en trabajos anteriores. A continuación, proponemos y desarrollamos un método de diseño original basado en la condición de haz único, que suprime eficazmente la radiación fuera del chip, lo que permite obtener dispositivos DBD de bajas pérdidas. Sobre la base de estos enfoques originales, se diseñó y demostró experimentalmente un demultiplexor de baja pérdida de longitud de onda. También se ha investigado la sintonización térmica del demultiplexor y la respuesta plana. Por último, exploramos el uso de dispositivos DBD como elementos de alimentación para antenas emisoras de superficie basadas en rejillas, una aplicación que permite la generación eficiente de haces de espacio libre de gran superficie y altamente direccionales generados en el chip.

En esta introducción se presenta brevemente la fotónica de silicio [*silicon photonics (SiPh)*] y se describen sus principales ventajas y limitaciones. A continuación, se revisa el estado del arte de algunos bloques fundamentales para los que los DBD desarrollados podrían tener un impacto beneficioso. A continuación, describimos el principio de funcionamiento de los deflectores Bragg distribuidos y las implementaciones prácticas de diseño. Por último, se exponen las aportaciones más significativas de esta Tesis.

### B.1.1 Fotónica de silicio

#### B.1.1.1 Visión general

La fotónica de silicio es la tecnología que permite construir circuitos integrados fotónicos [*photonic integrated circuit (PIC)*] de alta densidad utilizando el proceso de fabricación microelectrónica de semiconductor complementario de óxido metálico o *complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS)* [Bogaerts2018; Rahim2018; Khan2019]. La idea de utilizar el silicio para fabricar dispositivos fotónicos fue propuesta por primera vez por Soref *et al.* en 1986 [Soref1986]. Utilizando el proceso compatible con CMOS, la fotónica de silicio puede lograr una producción en masa de bajo coste, ya que aprovecha



las instalaciones de fabricación de semiconductores y los conocimientos técnicos ya desarrollados por la industria microelectrónica integrada, y los aplica a PICs. De hecho, esto ha quedado demostrado por el éxito comercial de la fotónica de silicio integrada que hemos presenciado durante la última década [Siew2021; Thomson2016; Yole Développement2021].

Los productos de fotónica de silicio se comercializan desde finales de los años 90. Por ejemplo, en 1997 Bookham lanzó un atenuador óptico variable basado en una plataforma SOI gruesa (*thick-SOI*) con un notable éxito comercial [Rickman2014]. El mercado de la fotónica de silicio fue impulsado en un primer momento por las aplicaciones de comunicación [Intel Corporation2021; Cisco Systems Inc2021b; MACOM2021; Shi2020b; Doerr2018], pero las previsiones de mercado apuntan ahora a un importante crecimiento en el ámbito de la sanidad y la detección, así como en otras aplicaciones no relacionadas con la comunicación [Yole Développement2021; Siew2021]. Entre estas últimas se encuentran los sistemas de LIDAR, indispensables para los coches autónomos [Kim2021; Barrett2021], los biosensores [Ikegami2021], la computación cuántica [Anderesen2021] y los giroscopios ópticos en chip [KVH Industries Inc2021], por citar algunos.

La industria de la fotónica de silicio está actualmente en auge. Las ventas de productos han aumentado y se han producido adquisiciones multimillonarias de empresas de fotónica de silicio por parte de grandes empresas como Nokia [Shi2020a], Cisco [Cisco Systems Inc2021a; Miller2018], Juniper [Hardy2016b], Ciena [Hardy2016a] o Nvidia [Newsroom2019], entre otras.

### B.1.1.2 Plataformas fotónicas de silicio

La tecnología de la fotónica de silicio se presenta en varias formas. De hecho, la fotónica de silicio reúne muchas plataformas tecnológicas compatibles con CMOS, cada una de ellas caracterizada por las capas de material específicas y los diferentes niveles de grabado que usa. Entre las diferentes plataformas de materiales se encuentran *silicon-on-insulator* (SOI), nitruro de silicio [*silicon nitride* (SiN)], germanio sobre aislante, germanio sobre silicio [*germanium-on-silicon* (GOS)], germanio sobre SOI, y GOS con nitruro, etc. [Rahim2018].

La plataforma dominante de fotónica de silicio es silicio sobre aislante (SOI), que utiliza el silicio y su óxido nativo, SiO<sub>2</sub>, como materiales principales. Se han desarrollado con éxito varios productos comerciales en SOI [Chen2018; Yole Développement2021]. SOI proporciona un contraste de índices muy alto ( $\Delta n \sim 2$ ) que permite la miniaturización y la alta densidad de integración. Se ha desarrollado con éxito tanto la tecnología SOI fina o *thin-SOI* como la gruesa o *thick-SOI* [Rahim2018]. Las guías de ondas *thin-SOI* tienen un grosor de capa de silicio de unos pocos cientos de nanómetros, lo que permite el funcionamiento mono-modo mediante guías de ondas de cresta. Las guías de ondas *Thick-SOI* tienen una capa de silicio a escala micrométrica que exige guías de ondas de tipo *rib* para garantizar el funcionamiento mono-modo. Históricamente, las guías de ondas *rib* de *thick-SOI* requerían grandes radios de curvatura (cientos de micrómetros) en comparación con las guías de ondas de canal usadas en *thin-SOI* (unos pocos micrómetros). Aunque se han demostrado radios de curvatura a escala micrométrica en guías de onda SOI de varias micras [Cherchi2013; Aalto2019], se basan en

guías de onda multi-modo de canal que requieren convertidores de modales cientos de micrómetros de longitud [Aalto2006], lo que amplía considerablemente el área total de la curva y aumenta las pérdidas. También se propusieron curvas basadas en espejos de reflexión total interna para thick-SOI, pero no se puede conseguir un funcionamiento de bajas pérdidas ( $< 0.1$  dB/90°) para ambas polarizaciones simultáneamente [Aalto2015]. En las plataformas SOI gruesas, el grosor comparativamente grande de la capa de silicio complica el patronaje de características pequeñas, el control preciso de las dimensiones de las guías de onda y la implementación de componentes activos de alta velocidad [Rahim2018]. Las plataformas de SOI sub-micrométrica o de *thin-SOI* suelen ser preferibles para circuitos complejos con un gran número de componentes. Luxtera eligió una plataforma *thin-SOI* para el primer tranceptor comercial en tecnología SiPh lanzado al mercado en 2007 [Greene2007]. La plataforma silicon-on-insulator (SOI) con una capa de silicio de 220 nm se ha utilizado normalmente y es la plataforma seleccionada para los dispositivos desarrollados en esta Tesis.

Silicon nitride se perfila como una alternativa complementaria a SOI [Blumenthal2018]. SiN tiene bajas pérdidas de propagación y puede sostener densidades de potencia muy altas, ya que SiN no sufre el efecto de absorción de dos fotones que limita la capacidad de manejo de potencia del silicio. Además, la ventana de transparencia de SiN supera sustancialmente a la del silicio e incluye las longitudes de onda visibles. No obstante, el precio a pagar es la densidad de integración, ya que el menor contraste de índices de SiN requiere un mayor radio de curvatura en comparación con SOI. También pueden utilizarse simultáneamente guías de onda de silicio y SiN en la misma plataforma, a costa de una mayor complejidad de fabricación [Sacher2018; Rakowski2020].

### B.1.1.3 Retos de la fotónica de silicio

El principal reto para SiPh surge de su baza más fuerte: la compatibilidad con el proceso CMOS. La compatibilidad con CMOS limita en gran medida la elección de los materiales que pueden utilizarse, principalmente el silicio y el dióxido de silicio y, con un mayor procesamiento, el germanio y el nitruro de silicio. Con este conjunto de materiales, es posible implementar dispositivos tanto pasivos como activos, estos últimos incluyendo moduladores y foto-detectores [Yang2019; Benedikovic2019; Vivien2012; Vivien2009; Gardes2009; Witzens2018; Reed2010; Sun2019]. Sin embargo, utilizando estos materiales, es difícil proporcionar la ganancia óptica requerida para las fuentes láser, aunque se han demostrado resultados alentadores en germanio sobre silicio [Camacho-Aguilera2012].

La optimización de los dispositivos pasivos se beneficiaría enormemente de la disponibilidad de un continuo de índices de refracción, mientras que los materiales compatibles con CMOS sólo proporcionan un conjunto discreto de índices de refracción. Esta restricción se ha resuelto eficazmente mediante el uso de metamateriales basados en estructuras sub-longitud de onda [sub-wavelength grating (SWG)]. Estas estructuras nano-fotónicas, desde su primera demostración en guías de onda de silicio [Cheben2006a; Schmid2011; Schmid2008; Schmid2007; Bock2009; Cheben2006b] se han utilizado ventajosamente como una poderosa herramienta para superar las limitaciones de rendimiento de los dispositivos fotónicos integrados convencionales basados en sili-

cio [Cheben2018; Halir2018; Luque-González2021b]. Las rejillas SWG son estructuras periódicas formadas por materiales dieléctricos y que presentan un periodo menor que la longitud de onda, frustrando así la difracción. El medio actúa a nivel macroscópico como un metamaterial homogéneo, lo que permite personalizar las propiedades ópticas del medio mediante el diseño geométrico. Las pequeñas características requeridas por el SWG pueden ser esculpidas con precisión con la litografía de haz electrónico (e-beam), así como con la litografía de inmersión en el ultravioleta (UV) profundo (deep-UV) [Rakowski2020; CEA-Leti2021; imec2022a]. Los metamateriales SWG tienen una importancia fundamental para esta tesis, ya que permiten la ingeniería del índice de refracción necesaria para la implementación práctica de los dispositivos DBD, basados en un proceso con único nivel de grabado.

En el caso de los dispositivos activos, el problema pendiente es que los materiales compatibles con CMOS no son del todo adecuados para fabricar láseres eficientes en la banda del infrarrojo cercano, que es la que utilizan prácticamente todas las aplicaciones de telecomunicaciones y comunicación de datos en red local (datacom) [Chen2018]. Para sortear este problema, se ha utilizado la integración híbrida y heterogénea de materiales de la tecnología III-V en aplicaciones prácticas [Liu2021; Szelag2019; Billah2018; Liang2021; Fahrenkopf2019].

B.1.1.4 El paradigma fab-less y la contribución de esta tesis al avance de la fotónica de silicio

Foundry	Platform	Technology	Access	Waveguide Layer Thickness (nm)
<b>RAPID PROTOTYPING SERVICES</b>				
AMO	Thin-SOI SiN	e-beam	Direct	220,340 100-400
Applied Nanotools	Thin SOI SiN	e-beam	Direct	220, 300,500 400
CNM/VLC	SiN	e-beam	Direct	300
Cornerstone	Thin-SOI SiN Suspended Si	248 nm	Direct/Europractice	220,340,500 300 500
LIGENTEC	SiN	-	Direct	up to 2500
<b>CMOS PILOT LINES &amp; RESEARCH INSTITUTES</b>				
AIM (SUNY)	Thin-SOI SiN	193 nm immersion -	MOSIS	220 nm -
LIGENTEC	SiN	-	Direct	up to 2500
CEA-LETI	Thin-SOI Ge/SiGe SiN	193 nm immersion	CMP/Europractice	310 Up to 3000 800nm
IHP	SiGe BiCMOS	248 nm	Europractice	220
IMEC	Thin-SOI SiN	193 nm Immersion	Europractice Direct	220 -
INPHOTEC	Thin-SOI	e-beam	Direct	220
Sandia Lab	Thin-SOI SiN	- -	Direct	240 -
VTT	Thick-SOI	UV	Direct	3000
<b>INDUSTRIAL FABs</b>				
AMF	Thin SOI SiN SiN-on-SOI	193 nm 248 nm -	Direct/Europractice	220 400/600 -
CompoundTek	Thin SOI SiN	193 nm immersion	Direct	- -
GlobalFoundries	Thin SOI SiN	193 nm immersion	MOSIS, Direct, TAPO,Europractice	160 nm 300 nm
SilTerra	Thin SOI	-	Direct	-
SMIC	Thin SOI	-	Direct	340
ST Micro	Thin SOI SiN	193 nm immersion	Direct	300 600
Tower Semiconductor (Intel)	Thin SOI	193 nm	Direct	-
TSMC	Thin SOI	-	-	-
LioniX	SiN	UV	Direct/Europractice	flexible

**Table B.1:** Ejemplos de plataformas tecnológicas de fotónica de silicio de libre acceso ofrecidas por varias fábricas. Adaptado de [Rahim2018] y actualizado con datos de diversas fuentes ([Siew2021; IPSR-I2020; EUROPRACTICE2022], APNT:[Applied Nanotools Inc2022], CNM/VLC: [IMB-CNM2022], Cornerstone:[Littlejohns2020]; LIGENTEC: [LIGENTEC2022], AIM: [Fahrenkopf2019], CEA-LETI: [CEA-Leti2021], IHP: [IHP], IMEC: [imec2022b], INPHOTEC: [INPHOTEC], VTT: [Aalto2019], AMF:[AMF2022], CompoundTek: [CompoundTek2022], GlobalFoundries: [Rakowski2020], ST Micro: [Boeuf2018], Tower Semiconductor: [Tower Semiconductor2018], LioniX: [Wörhoff2015]).

La actual demanda mundial de chips fotónicos de silicio sigue siendo ínfima en comparación con el mercado de chips electrónicos. En esta situación, para la mayoría de las empresas no es económicamente viable tener una *foundry* dedicada exclusivamente a la fabricación de chips fotónicos. El modelo "fab-less" es el más utilizado, ya que la misma *foundry* es compartida por muchos clientes, lo que reduce el coste de entrada en el sector para los recién llegados. En este modelo, una *foundry* proporciona servicios de fabricación de chips en una plataforma estandarizada a la que pueden acceder abiertamente terceros diseñadores sin fábrica [Khan2019; Rahim2018; Siew2021]. La tabla B.1 muestra una lista de *foundries* de acceso abierto y sus tecnologías. Los dispositivos prototipo desarrollados en esta tesis fueron fabricados por una *foundry* externa, Applied Nanotools [Applied Nanotools Inc2022].

La *foundry* suele proporcionar a los diseñadores un kit de diseño de proceso [*process design kit (PDK)*] que incluye la descripción de la tecnología de la plataforma, las reglas de diseño y algunos dispositivos fotónicos optimizados, entre otros datos. Un PDK suele contener una biblioteca de componentes fotónicos que constituyen los bloques de construcción de circuitos fotónicos complejos. Los diseñadores también pueden diseñar sus componentes a medida, pero las funciones más básicas, como la división de la potencia, la interconexión y el acoplamiento, suelen estar cubiertas por la PDK de la *foundry*. Los PDKs más sofisticados vienen con componentes de software que pueden conectarse a los programas de diseño asistido por ordenador o *computer-aided design (CAD)* más populares, lo que acelera el desarrollo.

Para esta tesis hemos utilizado la *foundry* de acceso abierto y hemos desarrollado nuevos bloques de construcción que pueden utilizarse para desarrollar PICs complejos. Esto se alinea con las principales líneas de investigación del grupo de investigación de Photonics & RF de la Universidad de Málaga en el que se ha llevado a cabo esta tesis doctoral. El trabajo de este grupo se ha dedicado a diseñar nuevos bloques de altas prestaciones para SiPh [Luque-González2019; Halir2016; Pereira-Martín2021; Pérez-Armenta2020; Herrero-Bermello2020; Luque-González2020; Luque-González2021a; Sánchez-Postigo2021a; Sánchez-Postigo2021b; González-Andrade2021; Ginel-Moreno2020; Ginel-Moreno2021]. En esta tesis se han explorado las oportunidades que ofrecen los deflectores Bragg distribuidos para implementar nuevos bloques de construcción para la plataforma SOI, concretamente:

**Conformadores/expansores de haz** La conformación del haz es una función esencial en la fotónica integrada. Una de las operaciones de conformación del haz más importantes es la conversión del tamaño del punto. Dado que SOI tiene un alto contraste de índices, el tamaño del modo fundamental de las guías de onda de interconexión es pequeño. A menudo es necesario ampliar el modo. Esto se lleva a cabo normalmente mediante transiciones (*tapers*) adiabáticas, lentes basadas en metamateriales [Luque-González2019], *tapers* de forma optimizada [Fu2014] o acopladores evanescentes [Kim2018; Ropp2021]. En esta tesis, presentamos un dispositivo compacto basado en deflectores capaz de expandir el modo de la guía de onda con una compacidad y eficiencia sin precedentes. El dispositivo también es capaz de dar forma tanto a la amplitud como a la fase del campo generado en un espacio muy compacto, mientras que el control de la fase puede proporcionar funcionalidades adicionales interesantes.

**Acopladores fuera del chip** PICs requieren interfaces de entrada/salida que, debido a las dimensiones de la guía de ondas, son un reto para las guías de ondas de alambre de silicio. Los acopladores de entrada/salida de alta calidad son, por tanto, un componente clave en el desarrollo de SiPh [Vermeulen2018]. La mayoría de las interfaces ópticas de los chips pueden clasificarse en tres categorías: acoplamiento de fibra a chip, de chip a chip y de espacio libre a chip [Vermeulen2018]. Los acopladores de fibra a chip son los más comunes, ya que las fibras ópticas son un medio de interconexión estándar para muchas aplicaciones. Los acopladores espacio libre a chip son importantes para los sistemas de comunicación LIDAR y espacio libre, en los que es necesario generar y recibir haces en el espacio libre. Los acopladores chip a chip se utilizan cada vez más en los sistemas integrados de forma heterogénea, en los que se combinan otras tecnologías fotónicas con SiPh para proporcionar funcionalidades adicionales (por ejemplo, la generación de luz).

Una solución sencilla para acoplar la luz a o desde un chip fotónico es a través de acopladores de borde. Este enfoque supone un reto cuando se interconectan fibras ópticas estándar debido a la gran diferencia de tamaño de modo entre el modo de la fibra y el modo de la guía de ondas en el chip. Para solucionar este problema, las soluciones más utilizadas son las derivaciones inversas [Almeida2003] y los acopladores de borde de ingeniería de rejilla de sub-longitud de onda [Cheben2015]. Otro enfoque es utilizar acopladores de rejilla de superficie [Taillaert2002; Taillaert2004; Taillaert2006; Cheben2006a; Halir2010; Alonso-Ramos2010; Watanabe2017; Benedikovic2017]. A diferencia de los acopladores de borde, los acopladores de rejilla de superficie pueden colocarse arbitrariamente en cualquier lugar del chip y permitir la realización de pruebas a escala de oblea [Mekis2011]. Los acopladores de rejilla de superficie también pueden utilizarse para el acoplamiento entre los modos de propagación en el chip y los haces del espacio libre. Los arrays de acopladores de rejilla de superficie que actúan como antenas ópticas [Van Acoleyen2009; Van Acoleyen2011; Sun2013; Poulton2017; Ginel-Moreno2021], han sido utilizados en agrupaciones de antenas ópticas o *optical phased arrays (OPAs)* para sistemas LIDAR [Kim2021]. Estos arrays generalmente tienen una separación de elementos mayor que la longitud de onda, lo que conduce a la generación de lóbulos de rejilla (no deseados). En esta tesis, presentamos una nueva arquitectura basada en DBD que permite una alimentación compacta de un acoplador de rejilla ancho con lóbulos de rejilla eficientemente suprimidos, a la vez que permite la dirección 2D del haz de salida por efecto termo-óptico.

**(De)multiplexores** La demultiplexación de la longitud de onda es una función clave en los modernos sistemas de comunicación basados en multiplexación por división de longitud de onda [*wavelength division multiplexing (WDM)*] [Cheben2007; Okamoto2014; Shi2020b]. En los sistemas WDM, un medio de guiado óptico común transmite varios flujos de datos independientes (canales), cada uno de ellos transportado por una longitud de onda diferente. Los demultiplexores actúan como filtros de longitud de onda capaces de extraer cada canal a una guía de onda dedicada para su posterior procesamiento. Existen dos arquitecturas generales de multiplexación/demultiplexación: en serie y en paralelo, como se ilustra en la Fig. B.1. Las arquitecturas en serie pueden extraer/añadir un canal a la vez y deben

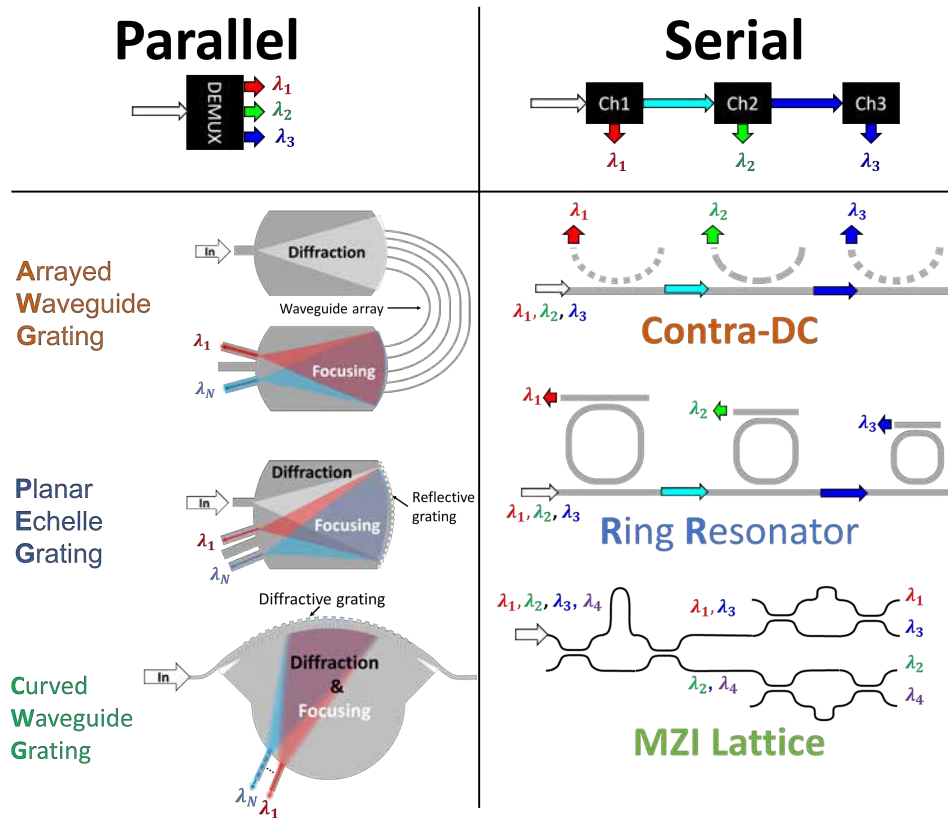
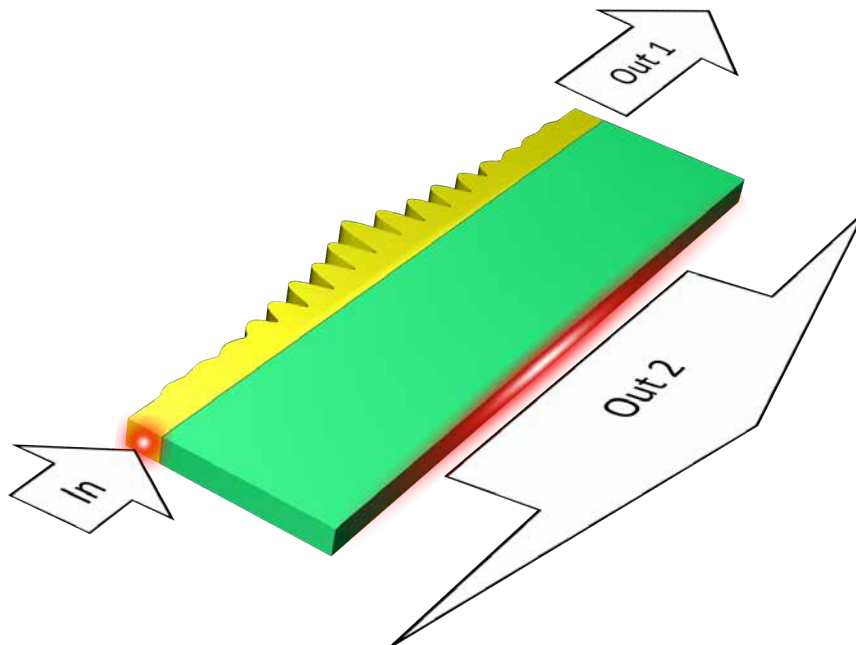


Figure B.1: Arquitecturas de demultiplexación en serie y en paralelo.

conectarse en cascada para extraer varios canales. Entre ellas se encuentran los filtros de Bragg [Cheben2019; Pereira-Martín2021; Pérez-Armenta2020], los resonadores de anillo, los filtros de celosía basados en interferómetros de Mach-Zehnder [*Mach-Zehnder interferometer (MZI)*] [Horst2013; Han2019] y los acopladores contra-direccionales [Naghdi2018; Yun2019; Shi2013]. Las arquitecturas paralelas pueden separar/combinar varios canales simultáneamente, véase la figura B.1. Entre ellas se encuentran los (de)multiplexores de tipo *arrayed waveguide grating (AWG)*, los Echelle (EG) y los de rejilla de guía curva [*curved waveguide grating (CWG)*] [Tondini2017; Okamoto2014; Bogaerts2010; Pathak2013; Melati2019; Pathak2014; Janz2004; Hao2006; Bock2008; Guerber2020]. El CWG se han propuesto y demostrado experimentalmente con resultados preliminares prometedores. Sin embargo, las pérdidas comparativamente elevadas han dificultado sus implementaciones prácticas [Hao2006; Bock2008; Bock2012]. En esta tesis, proponemos una nueva estrategia de diseño para CWG que reduce en gran medida las pérdidas, convirtiéndolas en una alternativa realista a las arquitecturas convencionales. Se ha diseñado un demultiplexor completo de CWG para la banda C y los resultados experimentales confirman el rendimiento de bajas pérdidas, tal y como predijeron las simulaciones rigurosas realizadas mediante el algoritmo de diferencias finitas en el dominio del tiempo o *finite-difference time-domain (FDTD)* tridimensional.

### B.1.2 Introducción a los deflectores de Bragg distribuidos

En 1978, Stoll propuso un nuevo bloque de construcción multifuncional para la fotónica integrada: el deflector Bragg distribuido o *distributed Bragg deflector (DBD)* [Stoll1978]. La realización más sencilla de un DBD comprende una guía de ondas de canal que se perturba periódicamente para producir una difracción bien controlada en una guíaonda de película adyacente al canal, como se muestra en la Fig. B.2. El modo fundamental que se propaga a través de la guía de ondas de canal se sincroniza en fase (*phase-matching*) al modo de guíaonda de película lateral mediante la perturbación periódica. Como consecuencia, se permite la transferencia de potencia entre los dos modos, mediada por la difracción producida por la perturbación periódica.



**Figure B.2:** Esquema de un expansor de haz basado en un DBD. El pequeño modo en la entrada se expande a un haz más amplio confinado en la guíaonda de película lateral (Out 2). Este haz confinado en la guíaonda de película puede transportar sólo una parte de la potencia de entrada y el resto puede permanecer en la guía de ondas de canal y pasar a través (Out 1).

La aplicación inmediata de los DBDs es la generación de un haz controlado confinado en una guíaonda de película. Esta capacidad puede aprovecharse directamente para implementar un expansor de haz compacto como el representado en la Fig. B.2. En este dispositivo, un modo altamente confinado (Fig. B.2, "In") que se propaga en la guía de onda del canal que comprende una perturbación de rejilla se difracta progresivamente hacia la guíaonda de película lateral como un haz gaussiano ancho (Fig. B.2, "Out 2"). Además de la conformación del haz, también puede obtenerse una división de la potencia, ya que la fracción de potencia acoplada a la guíaonda de película puede controlarse fácilmente ajustando la fuerza de la rejilla. Esta función se demostró experimentalmente en [Davis2004] en una plataforma de sol-gel. Recientemente se ha informado de dispositivos similares que aprovechan las fugas laterales en lugar de la



difracción para acoplar la luz de una guía de ondas de canal a una guíaonda de película para lograr la expansión del haz [Kim2018; Ropp2021].

Los deflectores basados en rejillas son intrínsecamente dependientes de la longitud de onda, por lo que pueden utilizarse para separar diferentes longitudes de onda. En 1998, Madsen y otros demostraron un espectrómetro que utilizaba una rejilla de difracción chirpeada en una guía de ondas de canal para acoplar la luz a una guíaonda de película como haz de enfoque [Madsen1998]. En el espectrómetro de Madsen, el *chirping* se utiliza para lograr el enfoque del haz confinado en la guíaonda de película. La posición del punto focal del haz se desplaza a medida que cambia la longitud de onda debido a la naturaleza dispersiva inherente a la rejilla de la guía de ondas. Basándose en este concepto, Hao *et al.* propuso un nuevo tipo de demultiplexor WDM: el grating de guíaonda curvada [*curved waveguide grating (CWG)*]. En el CWG, la rejilla de guía de ondas se coloca siguiendo un arco circular para lograr el comportamiento de enfoque sin *chirping*, ampliando así el ancho de banda de operación [Hao2006]. Esta arquitectura también se implementó en la plataforma SOI y se demostró experimentalmente en el NRC de Canadá [Bock2008; Cheben2010; Velasco2012; Bock2012]. Aunque el dispositivo demostrado era prometedor en términos de diafonía y ancho de banda, tenía pérdidas comparativamente altas que dificultaban sus aplicaciones. En esta tesis, abordamos con éxito estos problemas para implementar un demultiplexor eficiente WDM basado en la arquitectura CWG.

Por último, pero no menos importante, dado que los deflectores en SOI son dispositivos sensibles a la polarización, pueden utilizarse fácilmente para implementar funciones de control de la polarización [Stoll1978; Davis2004].

### B.1.3 Contribuciones a la tesis

#### B.1.3.1 Contribuciones directas

El principal objetivo de esta tesis fue demostrar la utilidad de los dispositivos DBD en la plataforma SOI para aplicaciones prácticas. En primer lugar, desarrollamos herramientas y metodologías eficaces para analizar y diseñar los dispositivos de DBD. A continuación, utilizamos estas herramientas para investigar y reducir las pérdidas que anteriormente habían obstaculizado la aplicabilidad de DBD. Por último, aplicamos estos diseños optimizados de deflectores para implementar nuevos dispositivos que amplían aún más la biblioteca de bloques de construcción de la plataforma SOI. En concreto, hemos demostrado un nuevo tipo de expansor de haz, varios demultiplexores y un alimentador de antena óptica ancha. Las contribuciones más relevantes derivadas de este trabajo se resumen a continuación:

1. Se ha desarrollado una nueva técnica de diseño basada en el análisis del modo Floquet-Bloch de un solo periodo de la rejilla. En comparación con una simulación FDTD 3D, esta técnica reduce en gran medida los recursos computacionales necesarios para llevar a cabo el diseño del dispositivo. También se desarrolló una herramienta original de análisis de modos Floquet-Bloch, basada en un simulador comercial de FDTD 3D [Synopsis Inc2020] y en técnicas avanzadas de análisis

espectral [Mandelshtam2001]. Posteriormente, esta herramienta se utilizó para investigar el origen de las elevadas pérdidas en los deflectores previamente reportados SOI. Se descubrió que las pérdidas se originan principalmente en la radiación fuera del chip, y se demostró que las pérdidas pueden reducirse por debajo de 2 dB mediante un diseño juicioso [Hadij-ElHouati2019b; Hadij-ElHouati2019a]. A continuación, se logró una mayor reducción de las pérdidas mediante una estrategia de diseño radicalmente nueva que aprovecha la denominada condición de haz único y mediante el uso de un metamaterial de sub-longitud de onda. De este modo, se suprimió casi por completo la pérdida fuera del chip y se demostró una pérdida de diseño sin precedentes de 0.3 dB [Hadij-ElHouati2021a].

2. Basándonos en los logros expuestos anteriormente, diseñamos y demostramos experimentalmente un demultiplexor CWG WDM que aprovecha la condición de haz único para alcanzar una pérdida de inserción muy baja de  $\sim 1$  dB [Hadij-ElHouati2021b; Hadij-ElHouati2021c]. Este demultiplexor requería que la radiación del deflector se dirigiera fuera del eje, lejos de la normal de la rejilla. Como resultado, los procedimientos de diseño tradicionales se volvieron inadecuados, ya que daban lugar a una elevada diafonía y a pérdidas debidas a las aberraciones en el plano focal. Se utilizó un nuevo enfoque de diseño, basado en la reciprocidad, para sortear este problema. También se han investigado otras mejoras de diseño: se demostró una respuesta espectral plana utilizando guías de onda de salida bimodales [Hadij-ElHouati2022]; y se ha propuesto un demultiplexor térmicamente sintonizable CWG colocando un calentador en la parte superior de el DBD (aún no publicado). Calentando el DBD se puede controlar el ángulo de difracción para todos los canales de longitud de onda simultáneamente. Estas ideas originales han sido patentadas [Hadij-ElHouati2020c].
3. Otra contribución directa de esta tesis es un nuevo método para alimentar antenas ópticas anchas que permite la dirección del haz en 2D mediante la combinación de la longitud de onda y el ajuste térmico, lo que abre interesantes perspectivas para la generación en el chip de haces orientables. Se ha diseñado y fabricado una antena óptica ancha completa y se está caracterizando experimentalmente. Esta invención también está protegida en la patente [Hadij-ElHouati2020c].
4. El efecto de radiación de un solo haz descubierto en este trabajo ha sido seguido por otros miembros del grupo que trabajan en una nueva solicitud de patente sobre nuevos acopladores de chip de entrada/salida de alta eficiencia.

### B.1.3.2 Contribuciones indirectas

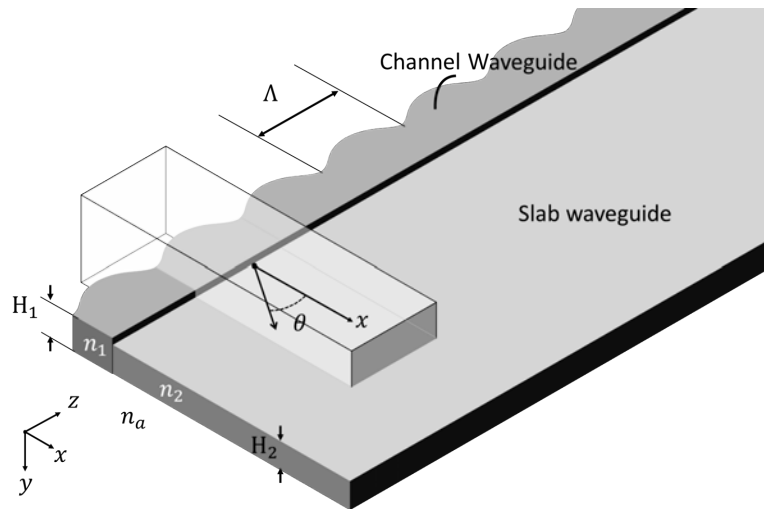
Las herramientas y técnicas desarrolladas durante esta tesis se han aplicado mucho más allá de los dispositivos DBD. Los conocimientos desarrollados en esta tesis han resultado útiles para determinar la sensibilidad de sensores bioquímicos SWG [Wangüemert-Pérez2019], implementar antenas milimétricas en guías de onda SOI [Ginel-Moreno2020; Ginel-Moreno2021], el diseño de un híbrido basado en un dispositivo de interferencia multi-modal o multi-mode interferometer (MMI)  $2 \times 4$  de alto rendimiento basado en metamateriales SWG. [Hadij-ElHouati2020b; Hadij-ElHouati2020a], y filtros espectrales complejos [Pereira-Martín2021].

La experiencia en el campo de SiPh adquirida por el candidato le permitió contribuir a una revisión sobre los metamateriales SWG para dispositivos nanofotónicos con anisotropía de ingeniería [Luque-González2021b].

## B.2 Deflectores de Bragg distribuidos

Los deflectores de Bragg distribuidos desarrollados hasta la fecha tienen pérdidas de inserción prohibitivas. En este capítulo pretendemos investigar el origen de estas pérdidas y desarrollar soluciones para superar esta limitación. Demostramos que la principal razón de las elevadas pérdidas en los diseños de deflectores de Bragg convencionales es la pérdida de radiación fuera del plano del chip. Se propone un nuevo paradigma de diseño basado en la "condición de haz único" para resolver este problema. El capítulo se organiza como sigue. En primer lugar, se presenta la geometría del deflector y su principio de funcionamiento. A continuación, se describen los parámetros de diseño relevantes y se introducen las nuevas herramientas desarrolladas para simular este tipo de estructuras. Por último, se extraen conclusiones.

### B.2.1 Geometría y principio de funcionamiento



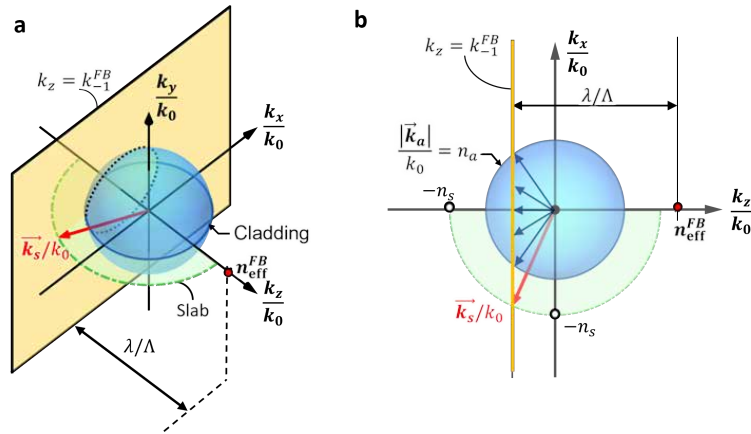
**Figure B.3:** Geometría de un deflector de Bragg distribuido que comprende una guía de ondas de canal con una perturbación periódica y una guía de ondas de losa lateral. El recuadro transparente indica una celda unitaria de la estructura periódica.

La figura B.3 muestra una geometría típica de un deflector periódico. El deflector comprende una guía de onda de canal con una perturbación periódica de período  $\Lambda$ , junto con una guía de onda de película adyacente. La guía de onda de canal, para la polarización y la longitud de onda de interés (típicamente la polarización transversal eléctrica o *transversal electric (TE)* y la longitud de onda central de 1550 nm), soporta un único modo cuasi-transversal, confinado en el plano XY y que se propaga a lo largo de la dirección z. Esto requiere que el índice efectivo de la guía de ondas de la guía de onda de película sea menor que el índice efectivo de la guía de ondas de canal. Esto puede lograrse utilizando i) un material de guía de onda de película con un índice

inferior al del núcleo (es decir,  $n_2 < n_1$ ), ii) una altura de guíaonda de película menor que la altura de la guía de ondas (es decir,  $H_2 < H_1$ ), iii) metamateriales SWG, o una combinación de estos tres enfoques. La luz que se propaga a través de la guía de ondas de canal es difractada por la rejilla periódica en direcciones discretas  $\theta_m$  hacia la guíaonda de película, y también se dispersa en un continuo de direcciones en el medio circundante con índice de refracción  $n_a$ . Este fenómeno es de naturaleza compleja y requiere métodos computacionales rigurosos para su estudio cuantitativo. En este trabajo se utiliza ampliamente el análisis modal de Floquet-Bloch para obtener una descripción cuantitativa del funcionamiento del dispositivo.

El modo de la guía de ondas de canal y los modos de la guíaonda de película pueden acoplarse entre sí, lo que da lugar a una transferencia de potencia entre ambos, siempre que se cumpla la condición de *phase-matching* entre algunos de los armónicos del modo Floquet-Bloch y los modos de la guíaonda de película que se propagan en las direcciones  $\theta_m$  dentro de la guíaonda de película, según la ecuación de la rejilla [Tamir1977]:

$$n_{\text{eff}}^{\text{FB}} + m \frac{\lambda}{\Lambda} = n_s \sin(\theta_m). \quad (\text{B.1})$$



**Figure B.4:** Diagrama de momentos para un acoplamiento con la guía de película lateral y el medio circundante con un índice de refracción  $n_a$ . (a) Vista 3D, (b) proyección en el plano XY. Las flechas rojas indican el vector de onda del modo que se propaga dentro de la losa. Los vectores de onda de las ondas que cumplen la condición de coincidencia de fase en el medio circundante describen una circunferencia en la esfera azul indicada por una curva discontinua en a). Un subconjunto de esos vectores de onda se indica en b) con flechas azules.

La máxima eficiencia de transferencia de potencia se consigue cuando sólo se permite que un orden (armónico con  $m = -1$ ) se acople a la guíaonda de película. Esto se consigue para la siguiente condición dada por la relación entre la longitud de onda y el periodo de la rejilla:

$$\frac{n_{\text{eff}}^{\text{FB}} + n_s}{2} < \frac{\lambda}{\Lambda} < n_{\text{eff}}^{\text{FB}} + n_s. \quad (\text{B.2})$$

En el siguiente análisis suponemos que se cumple esta condición y sólo se admite el orden -1. En general, la potencia dispersada por la rejilla de la guía de onda no se acopla exclusivamente a la guíaonda de película, sino también al medio circundante (índice de refracción  $n_a$ ). El continuo de ondas en el medio circundante tiene vectores

de onda  $\vec{k}_a$  que describen una superficie esférica de radio  $|\vec{k}_a| = k_0 n_a$ , como se muestra en azul en la Fig. B.4. A partir de este continuo, sólo se excitan las ondas que cumplen la condición de coincidencia de fase:

$$n_{\text{eff}}^{\text{FB}} + m \frac{\lambda}{\Lambda} = \frac{\vec{k}_a \cdot \hat{a}_z}{k_0}. \quad (\text{B.3})$$

Las condiciones de coincidencia de fase (B.1) y (B.3) pueden representarse geométricamente en el espacio de vectores de onda (espacio  $k$ ) como se muestra en la Fig. B.4. Las condiciones de coincidencia de fase del armónico -1 con los modos de la guíaonda de película y el medio circundante corresponden a la intersección del plano  $k_z = k_{-1}^{\text{FB}}$  con la circunferencia que contiene los vectores de onda permitidos dentro de la guíaonda de película (círculo verde en la Fig. B.4) y la superficie de la esfera de los vectores de onda permitidos en el medio circundante  $n_a$  (esfera azul en la Fig. B.4). Este diagrama es útil para obtener una comprensión más intuitiva de la física subyacente a través de una representación geométrica simple.

Como consecuencia de la transferencia de potencia del modo de la rejilla de la guía de onda a la guíaonda de película y al medio circundante, el modo Floquet-Bloch que se propaga en la guía de onda del canal tiene pérdidas y decae exponencialmente a lo largo de la dirección de propagación.

Este decaimiento puede cuantificarse con la fuerza de la rejilla (factor de fuga)  $\alpha$  que mide la fracción de potencia transmitida por la guía de ondas de la rejilla  $P_{\text{tx}}(z)$  que se irradia por unidad de longitud  $p_{\text{rad}}$  [Tamir1977]:

$$\alpha = \frac{p_{\text{rad}}(z)}{2P_{\text{tx}}(z)} = -\frac{1}{2P_{\text{tx}}(z)} \cdot \frac{\partial}{\partial z} P_{\text{tx}}(z). \quad (\text{B.4})$$

Muy a menudo estamos interesados sólo en la potencia transportada por un cierto orden de difracción  $m$  al medio  $M$ , por ejemplo, la guíaonda de película. Por lo tanto, es útil definir la eficiencia de difracción del orden  $m$ -ésimo al medio  $M$  [Tamir1977]:

$$\eta_m^M = \frac{p_{\text{rad},m}^M(z)}{p_{\text{rad}}(z)} = \frac{\alpha_m^M}{\alpha}, \quad (\text{B.5})$$

donde  $p_{\text{rad},m}^M$  es la potencia radiada por unidad de longitud por el armónico  $m$ -ésimo al medio  $M$ . Esta cantidad define la fracción de potencia difractada que se acopla al armónico  $m$ -ésimo en el medio  $M$ . Aquí nos interesa principalmente la potencia acoplada a la guíaonda de película a través del orden -1, y la eficiencia correspondiente  $\eta_{-1}^{\text{slab}}$ , por lo que en lo sucesivo nos referiremos a esta eficiencia como  $\eta$ .

## B.2.2 Herramientas de análisis y diseño de sistemas

Como se discutió en la sección anterior, el análisis de modos de Floquet-Bloch es un método riguroso para analizar estructuras periódicas. Calculando los modos de Floquet-Bloch podemos obtener el perfil de campo dentro de un solo período, así como el índice efectivo complejo del modo  $n_{\text{eff}}^{\text{FB}}$ . El índice efectivo determina la constante de fase  $\beta_{\text{FB}} = \text{Re}(n_{\text{eff}}^{\text{FB}}) k_0$  y la fuerza de la rejilla  $\alpha = -\text{Im}(n_{\text{eff}}^{\text{FB}}) k_0$ , mientras que el campo calculado permite determinar la eficiencia de difracción  $\eta_m^M$ .

### B.2.2.1 Parámetros del sistema y procedimiento de diseño para deflectores uniformes

A partir del modo Floquet-Bloch calculado podemos obtener los parámetros del sistema que describen el funcionamiento del deflector:

**Eficiencia de difracción  $\eta$ .** La eficiencia de difracción hacia el orden -1 se calcula utilizando una combinación de monitores de potencia y análisis de Fourier del perfil del campo modal.

**Potencia transmitida  $P_{\text{tx}}$ :** La potencia residual al final de la rejilla es:

$$P_{\text{tx}} = e^{-2\alpha L}, \quad (\text{B.6})$$

donde  $\alpha$  es la fuerza de radiación de la rejilla y  $L$  es la longitud de la rejilla.

**Potencia acoplada a la guíaonda de película  $P_{\text{slab}}$ :** La potencia acoplada al orden dado en la guíaonda de película se calcula a partir de la eficiencia de difracción y la fuerza de la rejilla como

$$P_{\text{slab}} = 1 - P_{\text{tx}} = \eta (1 - e^{-2\alpha L}). \quad (\text{B.7})$$

**Perfil de amplitud del campo difractado  $|r(z)|$ :** El campo difractado para una rejilla periódica sigue un perfil exponencial con el mismo factor de decaimiento que el modo de la rejilla

$$|r(z)| \propto e^{-\alpha z}. \quad (\text{B.8})$$

**Perfil de fase del campo difractado  $\varphi(z) = \angle r(z)$ :** Para una rejilla periódica uniforme, la variación de fase es lineal y viene dada por el índice efectivo del modo Floquet-Bloch, el periodo de la rejilla y el número de orden  $m$ . Suponiendo la propagación del modo de primer orden, el perfil de fase es

$$\varphi(z) = \angle r(z) = \varphi_0 - k_0 \left( \beta_{\text{FB}} - \frac{2\pi}{\Lambda} \right) z. \quad (\text{B.9})$$

Para deflectores uniformes (no apodizados) el procedimiento de diseño es sencillo, utilizando las ecuaciones (B.8) y (B.9) : el elemento difractivo se diseña para tener la fuerza de rejilla requerida  $\alpha$  para obtener la amplitud del campo objetivo mientras que el periodo de la rejilla necesita ser ajustado ('chirpeado') para obtener la fase lineal requerida dentro de la guíaonda de película. Por último, la fracción de potencia acoplada a la guíaonda de película se controla mediante la relación (B.7).

### B.2.2.2 FDTD-based Floquet-Bloch analysis

El método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo [*finite-difference time-domain (FDTD)*] es un método computacional electromagnético comúnmente utilizado, ya que puede resolver las ecuaciones de Maxwell directamente sin ninguna suposición sobre las fuentes o los materiales [Taflöv2005]. Los simuladores FDTD se han convertido

en el estándar de oro para el diseño de dispositivos fotónicos integrados. Sin embargo, el FDTD 3D es intensivo en términos computacionales y a menudo no es adecuada para el diseño de grandes estructuras, especialmente cuando se considera un amplio espacio de diseño multidimensional. Para el diseño de dispositivos a mayor escala, se prefieren técnicas de análisis modal menos intensivas en términos computacionales.

Para el diseño de estructuras periódicas resulta especialmente adecuado el análisis de modos Floquet-Bloch. Los simuladores FDTD pueden utilizarse para calcular eficazmente los modos Floquet-Bloch de las estructuras periódicas, si están equipados con PBC, que admite un desplazamiento de fase arbitrario entre los bordes del dominio enlazado periódicamente. Las condiciones de frontera de tipo Bloch o periódicas [*periodic boundary condition (PBC)*] permiten la simulación de un sistema periódico infinito mediante el cálculo de los campos en un único período (celda). Cuando se aplica un PBC a lo largo de una dimensión determinada,  $z$  por ejemplo, cualquier campo que salga del dominio de simulación por un lado vuelve a entrar por el lado opuesto multiplicado por un factor de fase.

En este trabajo, se ha utilizado el simulador comercial FDTD FullWave [Synopsys Inc2020] en combinación con el método de diagonalización de filtros [*filter diagonalization method (FDM)*], un algoritmo avanzado para análisis espectral, para implementar un resolutor iterativo del modo Floquet-Bloch para MATLAB [Mathworks Inc2017]. La herramienta primero configura adecuadamente el simulador FDTD en términos de PBC y la fuente. La fuente utilizada es un haz gaussiano de tamaño similar al modo Floquet-Bloch objetivo. La variación temporal de la fuente está limitada por la banda cerca de la longitud de onda de interés, utilizando una portadora sinusoidal con envolvente gaussiana. La frecuencia de la portadora se selecciona para que coincida con la longitud de onda del espacio libre de interés. A continuación, se ejecuta la simulación durante un tiempo suficiente, se analiza la variación temporal de los campos tras el apagado de la fuente mediante la implementación para Matlab del algoritmo FDM de Damião [Damião2015] para extraer las resonancias, y se obtienen los perfiles de los modos Floquet-Bloch y las frecuencias asociadas a un número de onda determinado. Este procedimiento se combina con el método de búsqueda de raíces secantes [Allen2019] para encontrar la constante de fase de Floquet-Bloch que debe imponerse en PBC para obtener una resonancia suficientemente cercana a la longitud de onda (frecuencia) de interés. Como subproducto de este algoritmo iterativo, la velocidad de grupo se obtiene mediante una relación de diferencias finitas. Por lo tanto, no sólo el número de onda de Floquet-Bloch, sino también la pérdida de propagación del modo puede determinarse utilizando la ecuación (2.20).

### B.2.2.3 Apodización

Para las aplicaciones prácticas, el perfil de campo exponencial con una fase lineal generado por un deflector uniforme no suele ser óptimo y se prefiere un perfil de haz arbitrario (intensidad y fase). Se puede sintetizar un campo difractado arbitrario variando la geometría del deflector, es decir, apodizando la rejilla. Esto añade otro grado de complejidad al diseño del deflector, ya que en lugar de un periodo, hay que diseñar cientos de elementos difractivos diferentes. Dado que la rejilla ya no es periódica, parece que para diseñar el deflector se necesitarían simulaciones FDTD 3D completas de toda la

estructura, lo que podría requerir recursos computacionales prohibitivos. Sin embargo, se puede utilizar un enfoque eficiente basado en el análisis de los modos Floquet-Bloch si la geometría varía lo suficientemente lento (adiabáticamente) a lo largo de la rejilla y la energía es transportada principalmente por el modo Floquet-Bloch fundamental. Para tales estructuras adiabáticas, el cálculo del modo Floquet-Bloch fundamental de los elementos difractivos es suficiente para el diseño completo del dispositivo. La amplitud del haz difractado, la fase y la potencia pueden obtenerse fácilmente a partir del análisis del modo local de Floquet-Bloch de los elementos individuales.

**Parámetros sistémicos para deflectores apodizados** Para una rejilla apodizada, los parámetros del sistema presentados en la subsección B.2.2.1 toman ahora la forma de funciones integrales, a lo largo de la posición en la rejilla  $z$ :

**Potencia transmitida:** La potencia transmitida por la rejilla de la guía de onda en la posición  $z$  puede calcularse integrando la intensidad de la radiación hasta esa posición:

$$P_{\text{tx}}(z) = e^{-2 \int_0^z \alpha(\zeta) d\zeta}. \quad (\text{B.10})$$

**Potencia acoplada al orden deseado en la guíaonda de película :** La potencia difractada por unidad de longitud hacia la guíaonda de película en el armónico -1 en la posición  $z$  puede expresarse utilizando (B.10) y (B.5) como:

$$p_{\text{slab}}(z) = 2\eta(z)\alpha(z)P_{\text{tx}}(z) = 2\eta(z)\alpha(z)e^{-2 \int_0^z \alpha(\zeta) d\zeta}. \quad (\text{B.11})$$

Integrando esta expresión a lo largo de toda la longitud del deflector  $L$  obtenemos la potencia total acoplada a la guíaonda de película :

$$P_{\text{slab}} = \int_0^L p_{\text{slab}}(z) dz. \quad (\text{B.12})$$

**Perfil de amplitud del campo difractado  $|r(z)|$ :** La amplitud del campo  $r(z)$  es proporcional a la raíz cuadrada de la potencia difractada por unidad de longitud  $p_{\text{slab}}(z)$ . Así, tomando la raíz cuadrada de la expresión (B.11) obtenemos:

$$|r(z)| \propto \sqrt{\eta(z)\alpha(z)} e^{-\int_0^z \alpha(\zeta) d\zeta}. \quad (\text{B.13})$$

**Perfil de fase del campo difractado  $\varphi(z) = \angle r(z)$ :** La fase  $\varphi(z)$  de la onda difractada por el armónico -1 hacia la guíaonda de película está definida por la constante de fase del modo Floquet-Bloch  $\beta_{\text{FB}}(z)$  y el paso de los elementos difractivos  $\Lambda(z)$  a lo largo del deflector:

$$\varphi(z) = \angle r(z) = \varphi(0) - \int_0^z \left( \beta_{\text{FB}}(\zeta) - \frac{2\pi}{\Lambda(\zeta)} \right) d\zeta. \quad (\text{B.14})$$

### Diseño de deflectores apodizados

El procedimiento de diseño de los deflectores apodizados es ciertamente más complejo que el de las rejillas periódicas uniformes. Sin embargo, la condición de adiabaticidad puede ser aprovechada para desarrollar un procedimiento de diseño simple y eficiente para deflectores apodizados que produce resultados muy precisos. El procedimiento desarrollado en esta tesis se describe a continuación:



1. Seleccione la fracción de potencia de entrada que será radiada por el deflector  $0 < C_{\text{rad}} < 1$ .  $C_{\text{rad}}$  se elige típicamente por encima de 0.95 para obtener diseños prácticos con bajas pérdidas en exceso ( $< 0.22$  dB).
2. Diseñe la variación de la fuerza de la rejilla  $\alpha(z)$  para el perfil objetivo  $r(z)$ . Esto se puede hacer fácilmente utilizando la ecuación (B.8) y suponiendo que  $\eta(z)$  es constante a lo largo de la rejilla, en cuyo caso se obtiene:

$$\alpha(z) = \frac{1}{2} \frac{|r|^2(z)}{C_{\text{rad}}^{-1} - \int_0^z |r|^2(\zeta) d\zeta}, \quad (\text{B.15})$$

donde  $L$  es la longitud del deflector y  $r(z)$  se normaliza de forma que  $\int_0^L |r|^2(z) dz = 1$ .

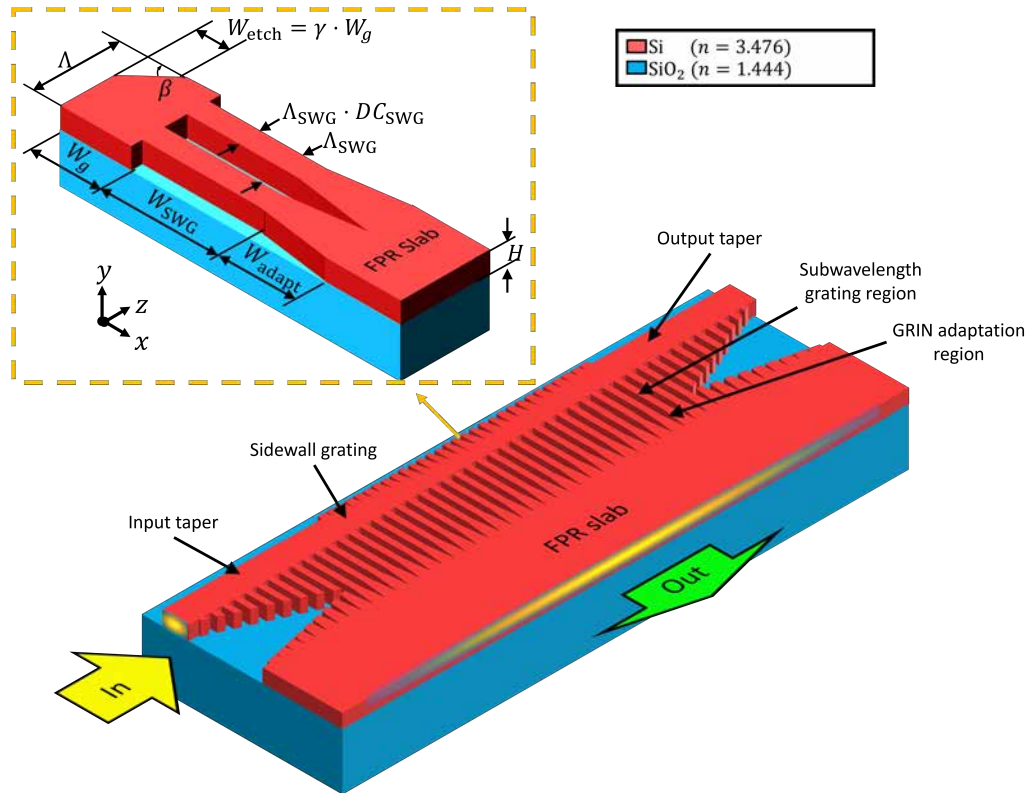
3. Diseñar un conjunto optimizado de elementos difractivos deflectores que sintetice las intensidades de radiación dentro del rango determinado en el paso anterior. Para esta tarea utilizamos el análisis eficiente de Floquet-Bloch, tal y como se describe en el apartado B.2.2.2. Buscamos geometrías que tuvieran la máxima eficiencia  $\eta$  manteniendo constante la parte real del índice efectivo. En este paso el periodo se establece en  $\Lambda_0$  para que todos los elementos irradian cerca de la dirección del objetivo.
4. A partir del conjunto de elementos difractivos previamente diseñados, se seleccionan aquellos que sintetizan la fuerza de rejilla requerida en cada posición a lo largo del deflector. Como resultado, se obtiene la geometría del deflector que sintetiza el perfil de amplitud del haz deseado.
5. Por último, se ajusta el periodo del deflector (chirping) a lo largo de la rejilla para obtener la variación de fase requerida:

$$\Lambda(z) = \frac{\lambda_0}{\text{Re}(n_{\text{eff}}^{\text{FB}}(z)) + \frac{\partial \varphi(z)}{\partial z} k_0^{-1}}. \quad (\text{B.16})$$

Cómo regla general, el ajuste del período aplicado no debe exceder de 5% para limitar los cambios en la fuerza de la rejilla que podrían afectar al perfil de amplitud.

### B.2.3 Diseño completo de un DBD apodizado

En esta sección, describiremos el diseño del DBD que aparece en el artículo [Hadij-ElHouati2019b]. Para una explicación detallada, remitimos al lector al documento original incluido en la sección A.1.

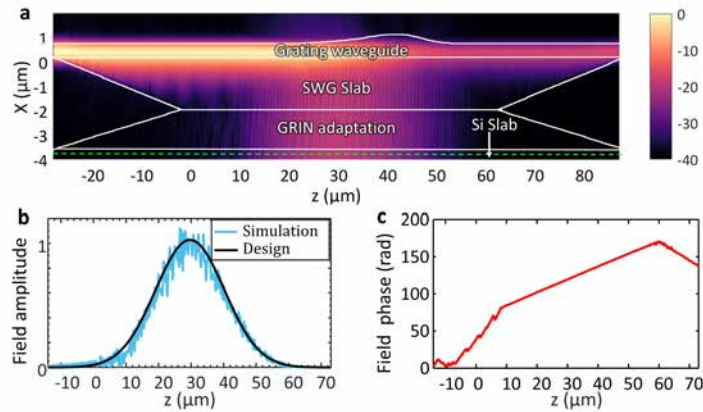


**Figure B.5:** Deflector de Bragg distribuido basado en una rejilla lateral que convierte un modo de *Si-wire* convencional (In) en un haz gaussiano confinado verticalmente que se propaga en el plano del chip (Out). La luz se difracta lateralmente desde la guía de ondas de alambre de silicio con una rejilla de pared lateral resplandeciente y se acopla a la región de propagación libre (FPR) de la guíaonda de película. La rejilla de sub-longitud de onda facilita el acoplamiento eficiente entre la guía de onda con rejilla y la guíaonda de película FPR, al tiempo que minimiza la fuga lateral del modo de la guía de onda. También se muestra un diagrama detallado del elemento difractivo. El revestimiento superior no se muestra para mayor claridad.

Siguiendo el procedimiento de diseño descrito anteriormente, hemos diseñado un expansor de haz DBD para la plataforma SOI que genera un haz gaussiano colimado de  $30\ \mu\text{m}$  de diámetro modal de campo [*mode field diameter (MFD)*], cuando se inyecta el modo TE en la guía de onda de entrada. La figura B.5 muestra la geometría del dispositivo que comprende un deflector apodizado, y conos adiabáticos de entrada y salida que se conectan gradualmente con la guíaonda de película metamaterial lateral. La región de la guíaonda de película lateral se implementó con un metamaterial SWG transitado a una guíaonda de película sólida de silicio a través de una región de índice gradual [*graded index (GRIN)*] de una longitud  $W_{adapt}$ .

El dispositivo completo se analizó mediante simulaciones 3D FDTD. La magnitud del campo magnético en el plano XY (en el centro de la capa de silicio) se muestra en la Fig. B.6(a). Se observa que la potencia que entra desde el hilo de silicio (entrada a la

izquierda) se irradia principalmente a lo largo de la dirección  $x$  como un haz gaussiano que se propaga en la guíaonda de película FPR. La figura B.6(b) muestra el perfil del campo magnético a lo largo de la línea discontinua verde trazada en la Fig. B.6(a). Se observa que el campo radiado está en buena concordancia con el campo objetivo, lo que también se corrobora por la alta integral de solapamiento de  $-0.18$  dB con el haz objetivo. La pérdida de inserción total del dispositivo, que se define como la fracción de potencia de entrada transferida al haz gaussiano, es de 2.15 dB (61 %), de la cual 1.87 dB corresponde a la pérdida de radiación fuera del plano, 0.18 dB al desajuste de campo y 0.1 dB se debe a la potencia residual transmitida.

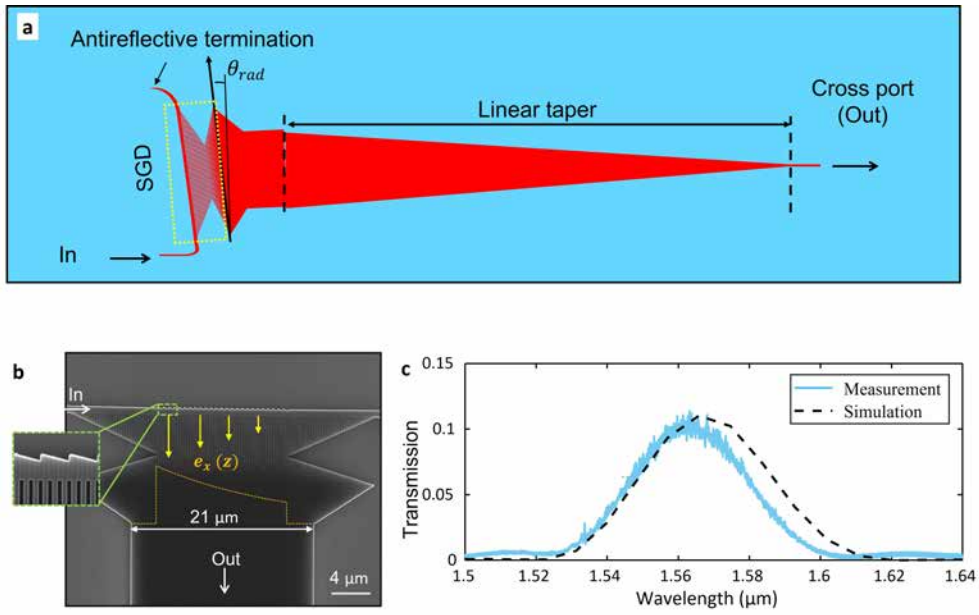


**Figure B.6:** a) Amplitud de la componente principal del campo magnético  $|H_y|$  en el plano XZ en el centro de la guíaonda de película de silicio. b) La magnitud del campo magnético  $H_y$  a lo largo de la línea verde discontinua en a). c) La fase del campo magnético  $H_y$  a lo largo de la línea verde discontinua en a).

### B.2.3.1 Validación experimental

Para realizar una verificación experimental preliminar, diseñamos un DBD uniforme que comprende 25 períodos idénticos (longitud total  $15 \mu\text{m}$ ), como se muestra en la Fig. B.7(a). Se utiliza una fuerza de radiación constante ( $\alpha = 0.01 \mu\text{m}^{-1}$ ) a lo largo de todo el DBD. El deflector se diseña de forma que 13 % de la potencia de entrada se irradia a la guíaonda de película FPR y se guía al puerto de salida (transversal), mientras que la potencia restante (72 %) permanece en la guía de onda *Si-wire*, terminada con una estructura antirreflectante. El haz que se irradia a la guíaonda de película FPR es capturado por una guía de onda ancha, girada para asegurar la incidencia normal en la longitud de onda central (véase la Fig. B.7(a)).

La figura B.7(c) muestra la transmitancia medida. La transmitancia es ligeramente inferior ( $\sim 0.1$ ) al valor diseñado (0.13), lo que se debe a la limitada resolución del proceso de patronaje. Esto se confirmó simulando un dispositivo con los parámetros determinados a partir de las mediciones del SEM. Los resultados de la simulación de la estructura con los parámetros medidos por microscopio electrónico de barrido [scanning electron microscope (SEM)] se incluyen en la Fig. B.7(b). La simulación y la medición arrojan valores similares de la transmitancia máxima ( $\sim 0.1$ ), la longitud de onda central ( $1.565 \mu\text{m}$ ) y el ancho de banda ( $\sim 40 \text{ nm}$ ), lo que demuestra que la estructura fabricada irradia efectivamente en la dirección diseñada y que la intensidad



**Figure B.7:** a) Esquema de una estructura de prueba DBD con una transición (*taper*) lineal. b) Imagen SEM del DBD fabricado. c) Transmitancia espectral simulada y medida del dispositivo.

de radiación experimental es similar al valor simulado para la geometría determinada por SEM.

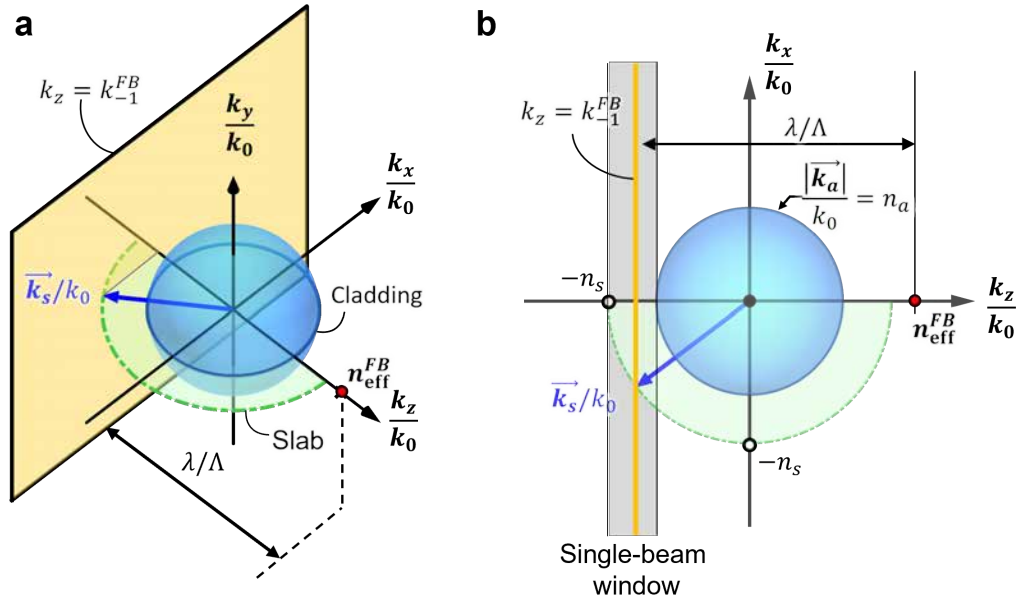
## B.2.4 Deflector de Bragg sin pérdidas

En esta sección, introduciremos la condición de haz único para suprimir la radiación fuera del chip en los deflectores de Bragg. Aprovechando este nuevo concepto, se diseñó un deflector de bajas pérdidas. Los resultados descritos en esta sección se publicaron originalmente en [Hadij-ElHouati2021a] (véase el apéndice A.2).

### B.2.4.1 La condición de haz único

Como hemos comentado en la sección anterior, la radiación fuera del chip es la principal fuente de pérdidas en los DBD. Esta pérdida se puede mitigar frustrando la adaptación del momento del armónico -1 en el medio circundante (es decir, el dióxido de silicio) y permitiendo la adaptación sólo dentro de la guía de ondas lateral. Ambas condiciones pueden cumplirse mediante la ingeniería juiciosa de la guíaonda de película y el número de onda del armónico -1  $k_{-1}^{\text{FB}}$ .

La condición necesaria, se puede deducir inmediatamente del diagrama de vectores de onda para esta estructura mostrado en la Fig. B.8, la superficie de la esfera azul con radio  $n_a$  representa los vectores de onda para todas las posibles ondas planas que se propagan en el medio circundante. La circunferencia verde con radio  $n_s$  representa los vectores-onda de todas las ondas que se propagan dentro de la guíaonda de película. El plano amarillo corresponde a los vectores-onda que cumplen la condición de coincidencia de fase con el orden -1 ( $k_z/k_0 = n_{\text{eff}}^{\text{FB}} - \lambda/\Lambda$ ). La intersección de este plano con la esfera



**Figure B.8:** Diagrama del espacio tridimensional de vectores de onda  $K$  para de un deflector a) y proyección en el plano  $XZ$  b). La ventana de difracción del haz único se muestra sombreada en gris en b). La flecha azul indica el vector de dirección de propagación del haz único permitido en la guíaonda de película para el periodo  $\Lambda$  que cumple la condición de haz único.

indica las ondas permitidas en el medio  $n_a$ . La intersección del plano amarillo con la circunferencia verde produce el vector-onda del orden de difracción -1 excitado en la guíaonda de película. De este diagrama se deduce que para conseguir un solo haz difractado dentro de la guíaonda de película, la relación entre la longitud de onda y el paso debe diseñarse de forma que el plano amarillo no intersekte la esfera azul pero sí la circunferencia verde. Con todo esto, es evidente que la condición haz único es:

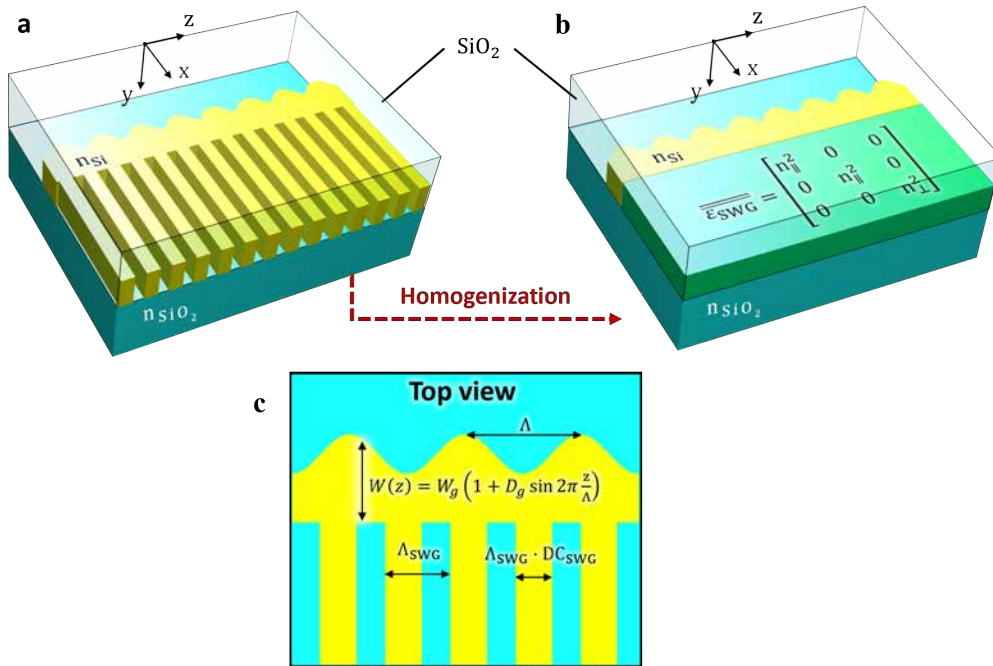
$$n_a + n_{\text{eff}}^{\text{FB}} < \frac{\lambda}{\Lambda} < n_s + n_{\text{eff}}^{\text{FB}}. \quad (\text{B.17})$$

Esta ventana de radiación de un solo haz restringe aún más la ventana de un solo orden de expresión (B.2).

#### B.2.4.2 Verificación de la condición de haz único

Para investigar más a fondo la condición de haz único y verificar su validez en un ejemplo de dispositivo práctico, se analizó una rejilla de guía de ondas simple (mostrada en la Fig. B.9(a)) utilizando el análisis de modo Floquet-Bloch. La modulación de esta rejilla es sinusoidal, es decir, no está resaltada. Es importante señalar que el perfil de rejilla de sierra ya no es necesario para optimizar la eficiencia, ya que la condición de haz único proporciona intrínsecamente la máxima eficiencia en un solo haz. Es ventajoso que la forma de la rejilla sinusoidal no tenga bordes o esquinas afiladas, que serían difíciles de fabricar, ya que son propensas a alisarse durante el proceso de patronaje.

Para analizar esta estructura, primero, se ha utilizado la homogeneización anisotrópica del metamaterial SWG [Luque-González2021b] para sustituir la región periódica SWG



**Figure B.9:** a) Esquema de una sección periódica del deflector sinusoidal y b) modelo homogeneizado en el que la región SWG se sustituye por un material anisótropo. c) Parámetros geométricos de la losa SWG y de la rejilla sinusoidal.

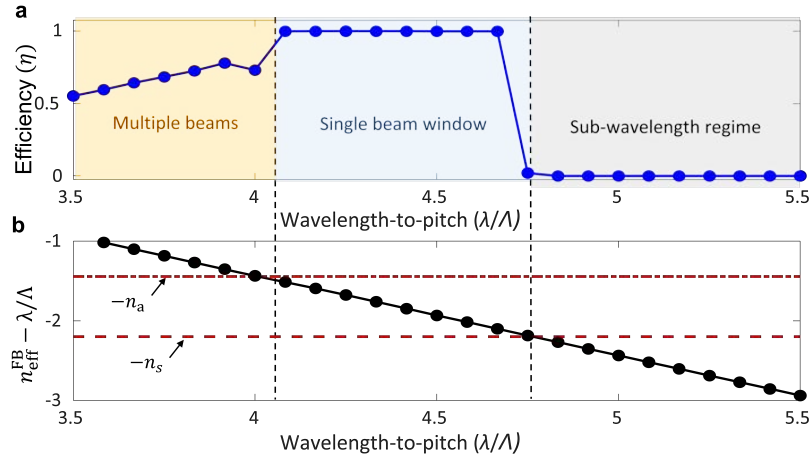
por un material homogéneo anisotrópico  $\overline{\epsilon}_{SWG} = \text{diag} [n_{\parallel}^2, n_{\parallel}^2, n_{\perp}^2]$ , de modo que la celda de simulación ya no necesita contener un número entero de períodos SWG. La guíaonda de película formada por este material anisotrópico, para la polarización TE, soporta un continuo de modos cuyos vectores de onda describen una elipse en la zona  $k_z$ - $k_x$ , a diferencia de la circunferencia en el caso isotrópico ilustrado en la Fig. B.8. Esta diferencia no afecta fundamentalmente al comportamiento del haz único, por lo que utilizamos aquí el modo de la guíaonda de película con un índice efectivo de  $n_s = 2.2$ .

La estructura homogeneizada mostrada en la Fig. B.9(b) se estudió mediante el análisis de modos Floquet-Bloch. Para la geometría considerada, el índice efectivo del modo Floquet-Bloch de la rejilla de la guía de onda es  $\sim 2.6$ . Por tanto, la condición de haz único se cumple para  $\lambda/\Lambda = [4.05, 4.8]$ . La figura B.10 muestra la eficiencia de difracción calculada  $\eta$  al orden de difracción -1 en la guíaonda de película SWG [Fig. B.10(a)] y el índice efectivo correspondiente al mismo orden de difracción [Fig. B.10(b)] en función de  $\lambda/\Lambda$ . La eficiencia de difracción para el orden -1 en la guíaonda de película SWG es 100% para  $\lambda/\Lambda \in [4.05, 4.75]$ , que está en excelente acuerdo con la condición haz único (Eq. (B.17)).

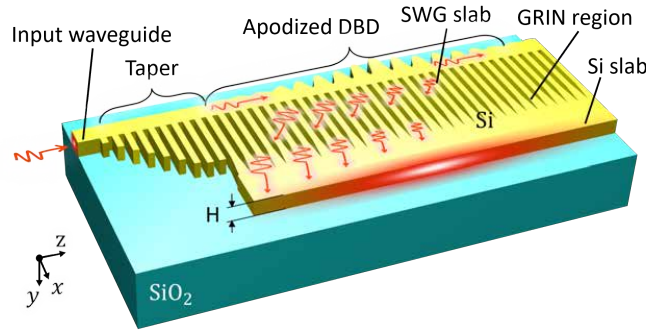
### B.2.4.3 Diseño de DBD sin pérdidas

Hemos diseñado un dispositivo deflector de Bragg distribuido que opera en el régimen de haz único. El dispositivo se muestra en la Fig. B.11.

El DBD se diseñó para generar un haz gaussiano con un MFD de  $50 \mu\text{m}$ . Para ello, se calculó la fuerza de rejilla necesaria para obtener el perfil de campo deseado



**Figure B.10:** Análisis de Floquet-Bloch de la estructura anisotrópica homogénea 3D mostrada en la Fig. B.9(b). a) Eficiencia de difracción  $\eta$  para el  $-1^{\circ}$  orden de difracción en la guíaonda de película SWG. b) Índice efectivo para el  $-1^{\circ}$  orden de difracción en función de la relación longitud de onda/paso ( $\lambda/\Lambda$ ). Las líneas rojas indican los valores límite para la operación con un solo haz.  $W_g = 600$  nm,  $D_g = 0.25$ ,  $\lambda = 1550$  nm,  $\Lambda_{\text{SWG}} = 200$  nm and  $\text{DC}_{\text{SWG}} = 0.5$

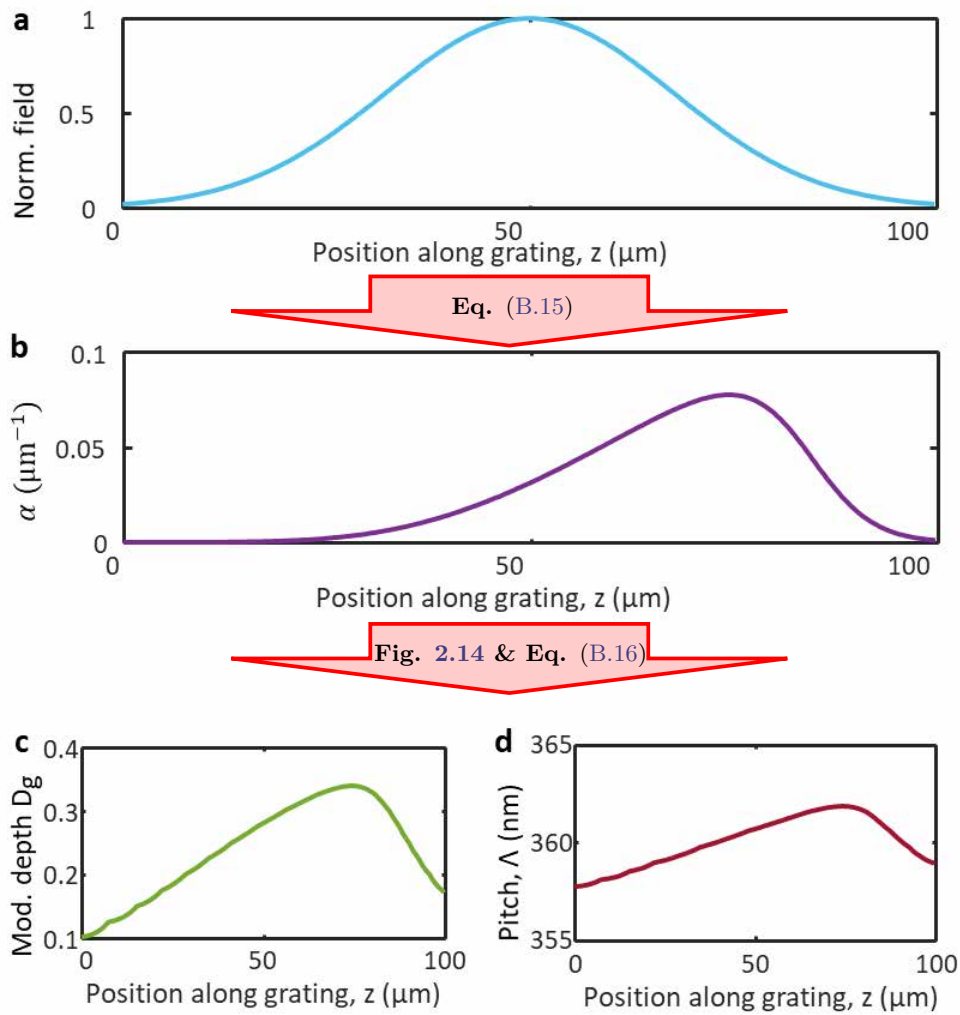


**Figure B.11:** Esquema del deflector de Bragg distribuido sin pérdidas, basado en elementos difractivos sinusoidales. Las flechas rojas indican la dirección del flujo de energía local (vector de Poynting). El revestimiento de dióxido de silicio no se muestra para mayor claridad.

mediante la ecuación (B.15). A continuación, se calculó la modulación de rejilla  $D_g(z)$  a partir de la fuerza de rejilla. El flujo de diseño se ilustra en la Fig. B.12 y el perfil de profundidad de modulación resultante  $D_g(z)$  se muestra en B.12(c).

#### B.2.4.4 Resultados y discusión

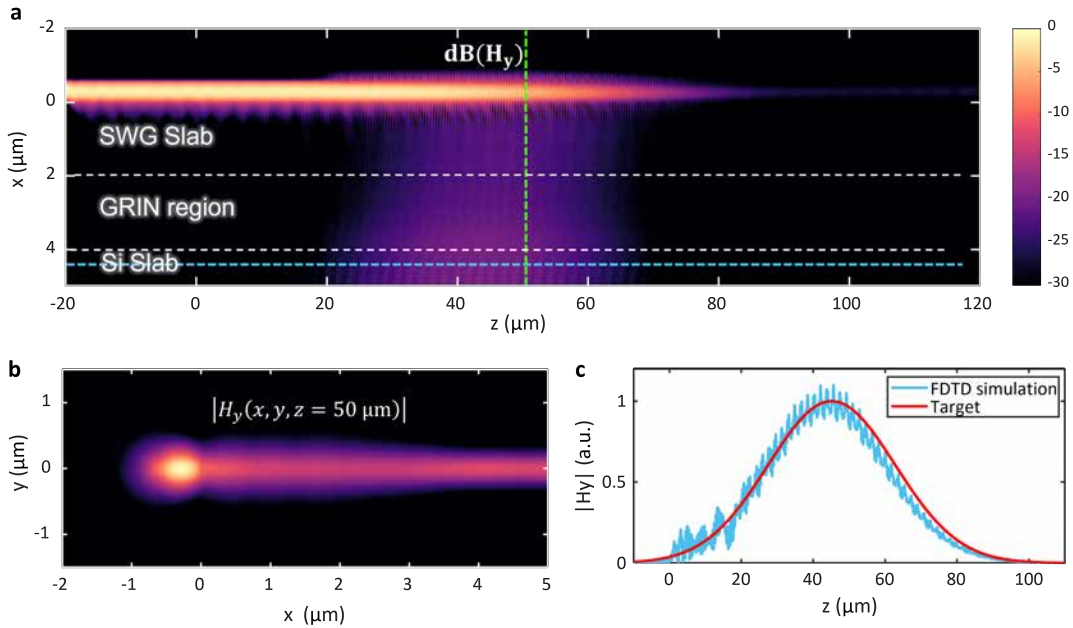
El dispositivo completo se simuló mediante FDTD 3D. La figura B.13(a) muestra el campo magnético calculado  $H_y$  (sección transversal XY tomada en el centro de la capa de silicio). Se observa que el modo de la guía de ondas del hilo de silicio se irradia progresivamente en la dirección  $x$  positiva, mientras que la radiación en la dirección  $x$  negativa se suprime eficazmente, incluso sin efecto *blazing*. Una pequeña fracción de potencia ( $< 0.5\%$ ) permanece en la guía de ondas al final de la rejilla, como se diseñó originalmente. La Fig. B.13(b) muestra una sección trasversal del campo cerca del centro de la rejilla. El campo radiado se dirige hacia la guíaonda de película de silicio con una alta direccionalidad, mientras que la radiación fuera del chip



**Figure B.12:** a) Perfil del haz del objetivo y la correspondiente b) fuerza de radiación  $\alpha(z)$  calculada por la Eq. (B.15). c) Profundidad de modulación de la rejilla a lo largo de la estructura del deflector obtenida mediante el mapeo de la fuerza de la rejilla a través de la Fig. 2.14(a). d) Paso de la rejilla obtenido a partir de la Ec. (B.16) y el índice efectivo de la Fig. 2.14(b).

se suprime. Además, aunque el confinamiento del campo en la dirección  $y$  aumenta lentamente a través de la región GRIN, no hay una pérdida de radiación significativa en esta transición. El perfil del campo difractado a lo largo de la línea discontinua azul de la Fig. B.13(a) se muestra en la Fig. B.13(c). Se observa que el perfil del haz difractado simulado (Fig. B.13(c), curva azul claro) coincide exactamente con el campo objetivo (Fig. B.13(c), curva roja). Observamos una pequeña ondulación en el campo simulado, probablemente causada por reflexiones residuales a lo largo de la dirección de propagación. Sin embargo, la influencia de la ondulación en la eficiencia de acoplamiento es insignificante, ya que la integral de solapamiento del campo simulado y del campo objetivo supera el 97%. La pérdida de inserción total a lo largo de todo el trayecto desde la guía de onda de alambre de silicio de entrada hasta el haz colimado es inferior a 0.3 dB. Esto supone una mejora de casi 2 dB con respecto al diseño clásico de la sección B.2.3. Es interesante destacar que esto se ha conseguido utilizando un





**Figure B.13:** a) Simulación FDTD 3D de la evolución del campo  $H_y$  a lo largo del dispositivo DBD completo. b) Sección transversal del campo  $H_y$  en un plano XY cerca del centro de la rejilla ( $z = 50 \mu\text{m}$ , línea verde discontinua en a). c) Distribución del campo  $H_y$  en la guía de ondas de la guíaonda de película (a lo largo de la línea azul discontinua en a). Se muestra el perfil del objetivo para comparar.

elemento difractivo con forma sinusoidal que es más fácil de fabricar en comparación con la forma de sierra con esquinas afiladas que se requiere en el DBD convencional para aumentar la eficiencia.

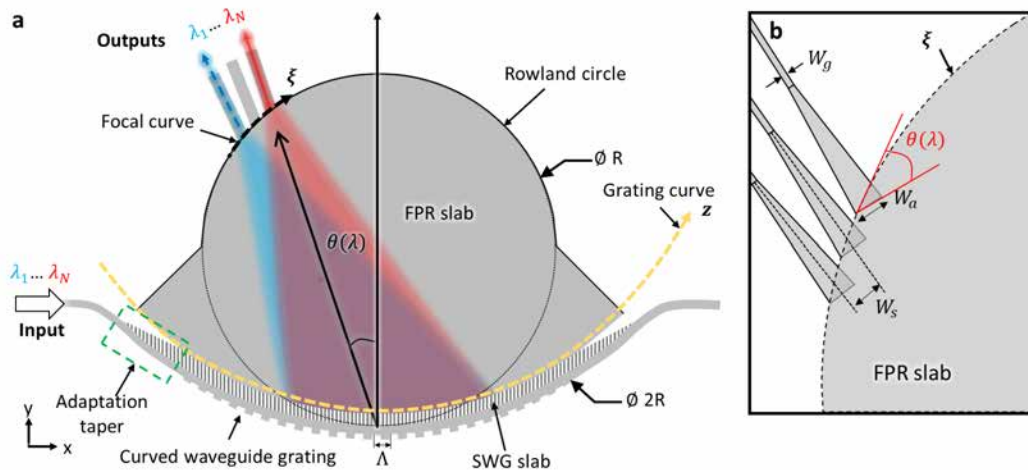
### B.2.5 Conclusiones

En resumen, hemos presentado una nueva estrategia para implementar deflectores de rejilla de Bragg distribuidos (DBD) en la fotónica de silicio. Hemos demostrado que las pérdidas de radiación fuera del chip pueden eliminarse prácticamente aprovechando una condición de ajuste de fase de un solo haz y la ingeniería de índice de refracción de metamateriales de sub-longitud de onda. Para demostrar este nuevo concepto, hemos diseñado un expansor de haz deflector de Bragg distribuido utilizando un análisis Floquet-Bloch computacionalmente eficiente de los elementos individuales. La simulación FDTD en 3D del dispositivo completo arroja una excelente concordancia con el diseño objetivo y confirma una pérdida de inserción baja récord de 0.3 dB. La capacidad de dar forma precisa a haces confinados en guíaonda de película con pérdidas insignificantes, como se ha demostrado en este trabajo, allana el camino para la implementación práctica de nuevos tipos de dispositivos basados en deflectores de Bragg distribuidos en la fotónica integrada. Dos ejemplos de estos nuevos dispositivos -un demultiplexor de longitud de onda y un alimentador de antena ultracompacto- se analizan en los dos capítulos siguientes de esta tesis.

### B.3 Demultiplexores de rejilla de guíaonda curva

Este capítulo está dedicado a los dispositivos de (de)multiplexación de longitudes de onda de tipo rejilla de guíaonda curva o *curved waveguide grating (CWG)*. Los CWGs utilizan un deflector curvo como elemento dispersivo para separar o combinar las diferentes longitudes de onda. Sugeridos como una alternativa prometedora a las arquitecturas convencionales [Hao2006; Bock2008], sus primeras demostraciones experimentales confirmaron pérdidas sustanciales que dificultaron su aplicabilidad inmediata [Bock2012]. Este capítulo presenta varias arquitecturas de (de)multiplexores CWG que mitigan eficazmente las pérdidas. Esto se consigue aprovechando la condición de haz único. En primer lugar, se presenta la geometría del demultiplexor CWG y su principio de funcionamiento. A continuación, se expone el procedimiento general de diseño utilizado en este trabajo, incluyendo una técnica de simulación eficiente y precisa para validar los diseños. Se presentan varios dispositivos CWG de bajas pérdidas, incluyendo un demultiplexor de 8 canales en banda C, un demultiplexor sintonizable y un CWG de respuesta pasobanda plana basado en guías de onda de salida bimodal.

#### B.3.1 Principio de funcionamiento del CWG



**Figure B.14:** a) Esquema de un demultiplexor de rejilla de guía de onda curvada fuera del eje en la plataforma SOI. El gris representa las zonas no grabadas (silicio). b) Detalle de las guías de onda de salida cerca de la curva focal.

La figura B.14(a) muestra una geometría típica de CWG en la plataforma SOI. El CWG consta de un deflector de rejilla curvado, una región de slab SWG, un FPR y un conjunto de guías de onda receptoras conectadas al FPR [véase la Fig. B.14(b)]. El deflector está curvado siguiendo un arco de radio  $R$  y las guías de onda de salida están situadas en un círculo de radio  $R/2$  - el círculo de Rowland. A medida que la luz se propaga a lo largo del deflector se difracta hacia la guíaonda de película FPR. Se produce un perfil de campo casi gaussiano a lo largo de la curva de la rejilla ( $z$ ) y se enfoca dentro de la guíaonda de película FPR en las aberturas de la guía de onda de salida situadas en el círculo de Rowland (curva focal  $\xi$ ). Como el ángulo de propagación del haz  $\theta$  en la guíaonda de película FPR varía con la longitud de onda, el punto focal

### B.3. Demultiplexores de rejilla de guíaonda curva

se desplaza a lo largo del círculo de Rowland y las diferentes longitudes de onda se acoplan a distintas guías de onda de salida. Este ángulo  $\theta$  viene dado por la ecuación de la rejilla:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{n_{\text{eff}}^{\text{FB}}(\lambda) - \lambda/\Lambda}{n_{\text{FPR}}}\right), \quad (\text{B.18})$$

donde  $n_{\text{FPR}}$  es el índice efectivo de la guíaonda de película FPR,  $n_{\text{eff}}^{\text{FB}}$  es el índice efectivo del modo Floquet-Bloch del deflector de rejilla, y  $\Lambda$  es el periodo de la rejilla.

Para lograr el funcionamiento de bajas pérdidas es necesario cumplir la condición de haz único (véase el apartado B.2.4.1). Para esta geometría, la condición de haz único puede expresarse como:

$$-\arcsin\left(\frac{n_{\text{SWG}}}{n_{\text{FPR}}}\right) < \theta < -\arcsin\left(\frac{n_a}{n_{\text{FPR}}}\right), \quad (\text{B.19})$$

donde  $n_a$  es el índice de revestimiento (típicamente  $\text{SiO}_2$ ) y  $n_{\text{SWG}}$  es el índice efectivo del modo de la guíaonda de película SWG. Observamos que los diseños casi normales ( $\theta \approx 0^\circ$ ) no son posibles si se desea un funcionamiento de bajas pérdidas, ya que la condición de haz único requiere, para la plataforma SOI de 220 nm considerada aquí, requiere  $\theta < -30^\circ$ .

El desplazamiento  $\delta\xi$  a lo largo de la curva focal puede expresarse en función del cambio de longitud de onda  $\delta\lambda$  como:

$$\delta\xi = RD\delta\lambda, \quad (\text{B.20})$$

donde  $R$  es el radio de curvatura del deflector y  $D$  es la dispersión angular del deflector de rejilla, que puede obtenerse fácilmente de la ecuación (B.18) como:

$$D = \frac{\partial\theta}{\partial\lambda} = \frac{n_{g,\text{FPR}} \sin\theta - n_{g,\text{FB}}}{\lambda n_{\text{FPR}} \cos\theta}, \quad (\text{B.21})$$

donde,  $n_{g,\text{FPR}}$  y  $n_{g,\text{FB}}$  son los índices de grupo del modo fundamental de la guíaonda de película FPR y del modo Floquet-Bloch de la guía de onda de rejilla, respectivamente.

La propagación del haz en la región de la guíaonda de película FPR puede modelarse mediante la integral de difracción escalar 2D de Rayleigh-Sommerfeld [Orfanidis2002].

#### B.3.2 Diseño de CWG fuera del eje

La estrategia de diseño utilizada en los informes anteriores de CWG para la difracción casi normal da lugar a elevadas pérdidas y diafonía para el diseño del demultiplexor fuera del eje, debido a la forma subóptima del punto generado en el plano focal [Hadij-ElHouati2021b]. Por lo tanto, desarrollamos una nueva estrategia de diseño del CWG con el objetivo de minimizar la pérdida de inserción. Para conseguirlo, aprovechamos la condición de haz único y hacemos coincidir la distribución del campo en el círculo de Rowland con el modo fundamental de las guías de onda de salida. Nuestro objetivo es el diseño más compacto, es decir, con un mínimo de  $R$ . El procedimiento de diseño incluye los siguientes pasos:

1. El ángulo de difracción  $\theta_0$  en la longitud de onda central se establece para cumplir la condición de haz único. Cuando se evalúa la condición (B.19) para una plataforma SOI de 220 nm, y considerando un índice efectivo típico de guíaonda de película SWG de  $n_{\text{SWG}} = 2.2$ , se obtiene un rango angular de haz único de  $-50^\circ < \theta < -30^\circ$ .
2. Seleccione la geometría del deflector y analice un elemento de difracción típico para obtener el ángulo de difracción seleccionado  $\theta_0$  y calcular la dispersión  $D$  utilizada en los siguientes pasos.
3. Elija la apertura de la guía de onda del receptor  $W_a$  que está relacionada con el tamaño angular del haz difractado  $\text{MFR}_\xi$  y, en consecuencia, con la longitud angular del deflector (es decir,  $\Phi_L = L/R$ ). Un  $W_a$  más pequeño permite reducir la separación de las guías de onda de salida  $W_s$ , es decir, para la misma separación de canales se puede utilizar un radio de rejilla más pequeño  $R$  y reducir el espacio del dispositivo.
4. La separación nominal de la guía de ondas  $W_s$  en la curva focal se elige para un nivel específico de diafonía:

$$\text{XT} = -4.34 \left( \frac{W_s}{\text{MFR}_\xi} \right)^2 \text{ [dB]}, \quad (\text{B.22})$$

donde  $\text{MFR}_\xi$  es el radio del campo de modo de la apertura de la guía de onda del receptor  $W_a$ .

5. Seleccione el radio de rejilla  $R$  necesario para la separación nominal del canal  $\Delta\lambda$ :

$$R = \frac{W_s}{D \cdot \Delta\lambda}. \quad (\text{B.23})$$

6. Calcular el perfil de campo en la curva de la rejilla  $E_G(z)$ , que será sintetizado por el deflector de la rejilla. Aquí, la integral de difracción escalar de Rayleigh-Sommerfeld, Ec. (B.24), se utiliza para encontrar la distribución de campo  $E_{RS}(z)$  en la curva de la rejilla cuando el modo fundamental se inyecta en la guía de onda de salida central. Utilizando el principio de reciprocidad [Potton2004], el complejo conjugado del campo obtenido  $E_{RS}(z)$  debe ser producido por el deflector de la rejilla, es decir,  $E_G(z) = E_{RS}^*(z)$ .
7. Finalmente, la apodización del deflector de rejilla y la función de chirping se diseñan siguiendo el procedimiento descrito en la sección B.2.2.3 para sintetizar el perfil de campo  $E_G(z)$ .

### B.3.3 Procedimiento de simulación

Es deseable simular el demultiplexor completo en 3D FDTD. Sin embargo, la gran huella del dispositivo ( $> 100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ) hace que esta tarea sea computacionalmente intratable. Para evitar esta limitación, hemos desarrollado un método de simulación eficiente y preciso. Separamos el problema de simulación completo en tres subproblemas que pueden resolverse por separado con recursos informáticos razonables y gran precisión:

1. **Análisis del deflector.** La curva del deflector se endereza y se analiza mediante un análisis completo en 3D FDTD. Al enderezar la curva, la ventana de simulación se reduce sustancialmente con una penalización insignificante en la precisión. Se utiliza una variación temporal sinusoidal pulsada para evaluar todo el ancho de banda de interés en una sola simulación. A partir de esta simulación, calculamos el perfil de campo complejo generado por el deflector  $E_G(z, \lambda)$  en la guíaonda de película FPR y la fracción de potencia  $P_{\text{slab}}(\lambda)$  acoplada a la guíaonda de película FPR frente a la longitud de onda, dentro del ancho de banda de interés.
2. **Propagación de la región FPR.** La propagación a través de la guíaonda de película FPR se calcula analíticamente mediante la integral de Rayleigh-Sommerfeld. El campo obtenido en el paso anterior,  $E_G(z, \lambda)$ , se sitúa en la curva de la rejilla [ $z$  en la Fig. B.14(a)] y se utiliza la integral de difracción de Rayleigh-Sommerfeld para propagar el campo en la guíaonda de película, formando el campo  $E_F(\xi, \lambda)$  en la curva focal [ $\xi$  en la Fig. B.14].
3. **Integral de solapamiento.** La integral de solapamiento se emplea para calcular la fracción de potencia acoplada al modo fundamental  $\Psi_{0,n}(\xi, \lambda)$  de la  $n$ -ésima guía de onda de salida por el campo producido por el deflector de rejilla en el plano focal,  $E_F(\xi, \lambda)$ :

$$\text{OL}_n(\lambda) = \frac{\int E_F(\xi, \lambda) \Psi_{0,n}^*(\xi, \lambda) d\xi}{\sqrt{\int |E_F(\xi, \lambda)|^2 d\xi} \sqrt{\int |\Psi_{0,n}(\xi, \lambda)|^2 d\xi}}. \quad (\text{B.24})$$

The transmisión espectral  $T_n(\lambda)$  desde la entrada hasta la  $n$ -ésima guía de onda de salida se calcula utilizando  $P_{\text{slab}}(\lambda)$  y  $\text{OL}_n(\lambda)$  como:

$$T_n(\lambda) = P_{\text{slab}}(\lambda) |\text{OL}_n(\lambda)|^2. \quad (\text{B.25})$$

#### B.3.4 Demultiplexor CWG de bajas pérdidas

En esta sección, presentamos brevemente el (de)multiplexor CWG reportado en [Hadij-ElHouati2021b], para una explicación detallada remitimos al lector al manuscrito original incluido en el apéndice A.3 y al material suplementario incluido en el apéndice A.4.

Nuestro objetivo es un (de)multiplexor de 8 canales con una longitud de onda central de  $\lambda_0 = 1550$  nm, una separación de canales de  $\Delta\lambda = 10$  nm, y una polarización en el plano (TE). El dispositivo está diseñado para una plataforma SOI que comprende una capa de silicio de 220 nm de grosor, una capa de 2- $\mu\text{m}$  de óxido enterrado y un revestimiento superior de 2- $\mu\text{m}$  de  $\text{SiO}_2$ .

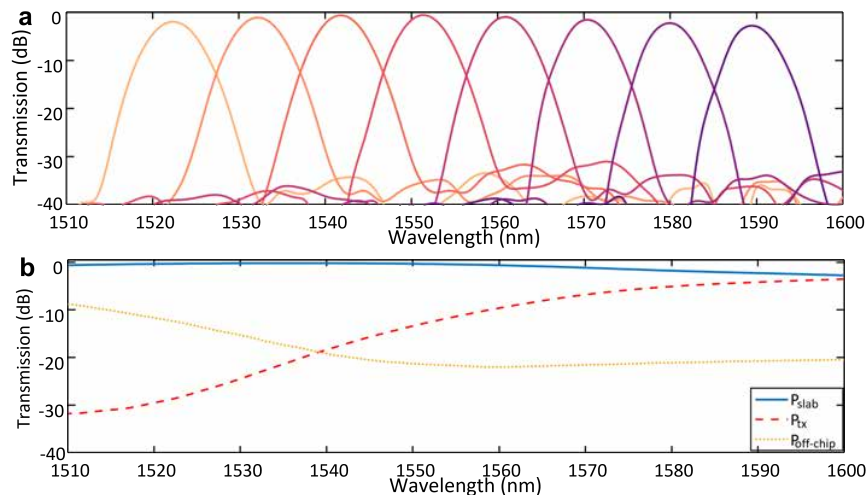
<b>Central wavelength</b>	$\lambda_0$	1550 nm
<b>Channel separation</b>	$\Delta\lambda$	10 nm
<b>Crosstalk</b>	XT	-60 dB

**Table B.2:** Especificaciones del demultiplexor de destino.

Hemos seguido el procedimiento descrito en la sección B.3.2 para diseñar el demultiplexor con las especificaciones resumidas en la tabla B.2. El demultiplexor consta de un

deflector de  $164\ \mu\text{m}$  de largo, curvado siguiendo un arco circular de radio  $R = 177\ \mu\text{m}$ . Las guías de onda de salida tienen una anchura de apertura  $W_a$  de  $2.1\ \mu\text{m}$  cerca de la guíaonda de película FPR y están espaciadas  $W_s = 2.8\ \mu\text{m}$  de centro a centro. En los apéndices A.4 y A.3 se incluye una descripción más detallada de la geometría del diseño.

El dispositivo fue simulado utilizando el procedimiento descrito en la sección B.3.3, obteniendo los espectros de transmisión mostrados en la Fig. B.15(a). La simulación predice una pérdida de inserción tan baja como  $0.5\ \text{dB}$  cerca de la longitud de onda central, que se reduce a  $2\ \text{dB}$  y  $2.7\ \text{dB}$  para los canales 1 y 8, respectivamente. Para longitudes de onda más largas, el aumento de las pérdidas se debe a la mayor potencia residual que queda en el extremo de la guía de ondas de la rejilla, como se muestra en la curva discontinua de la Fig. B.15(b). Esto se debe a que la fuerza de la rejilla disminuye para las longitudes de onda más largas. Por otro lado, la disminución de la eficiencia a longitudes de onda más cortas está causada por la aparición de la radiación fuera del chip [curva amarilla punteada en la Fig. B.15(b)].

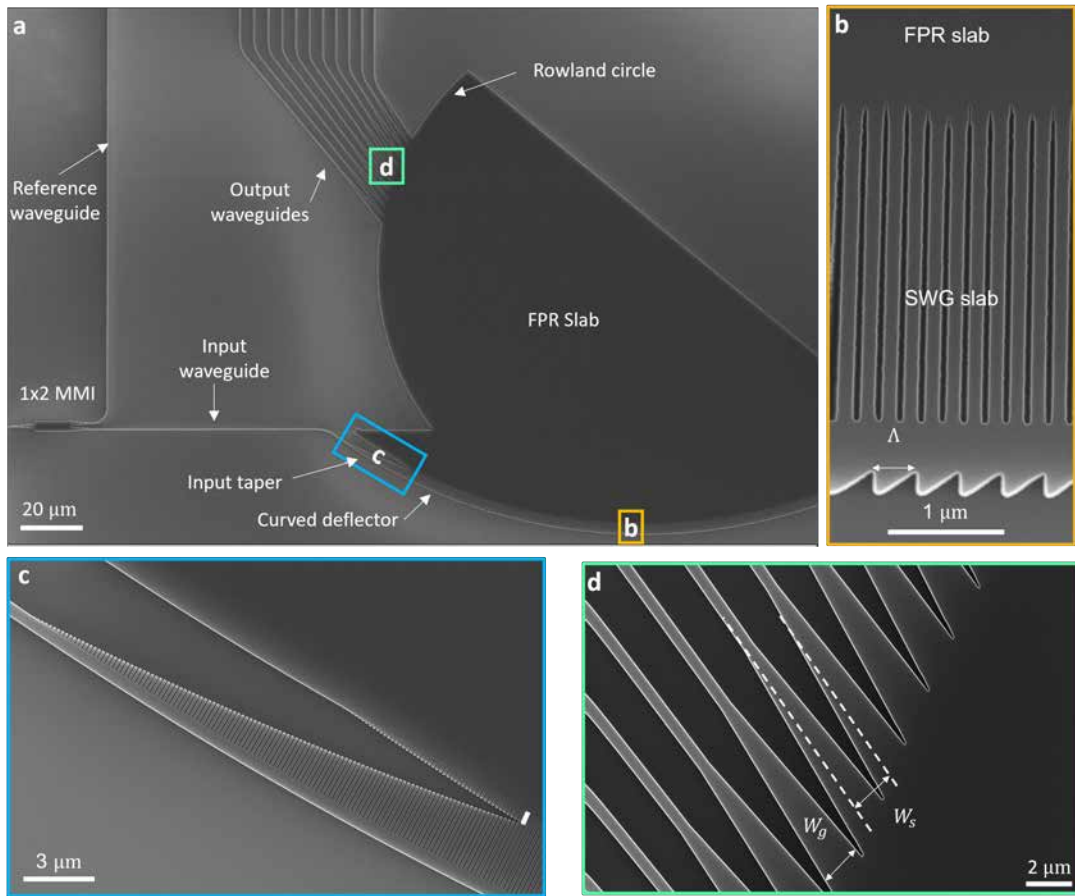


**Figure B.15:** a) Transmisión simulada desde la guía de onda de entrada a la de salida (pérdida de inserción del dispositivo) en función de la longitud de onda. b) La potencia acoplada a la región de la guíaonda de película (curva azul sólida), la potencia residual en el extremo de la guía de onda de la rejilla (curva roja discontinua) y la potencia radiada fuera del chip (curva amarilla discontinua).

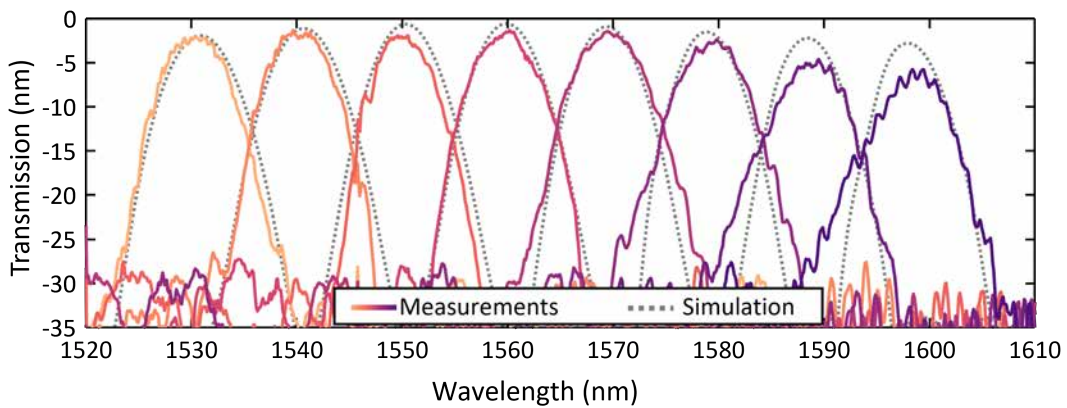
Este dispositivo fue fabricado por Applied Nanotools utilizando litografía de haz electrónico [*electron-beam (e-beam)*] y grabado iónico reactivo [*reactive-ion etching (RIE)*]. La figura B.16 muestra una imagen SEM del demultiplexor fabricado (a) junto con vistas detalladas del deflector (b), el cono de entrada (c) y las guías de onda de salida (c).

Las transmitancias de los 8 canales del dispositivo fabricado resultante se muestra en la Fig. B.17. Los espectros medidos muestran un desplazamiento de la longitud de onda con respecto a la simulación (curvas sombreadas en gris), estos últimos están desplazados en  $8.5\ \text{nm}$  en Fig. B.17. Este desplazamiento de la longitud de onda se atribuye a la variabilidad inherente a la fabricación, que puede compensarse mediante la sintonización activa, como mostramos en la siguiente sección.

### B.3. Demultiplexores de rejilla de guía de onda curva



**Figure B.16:** a) Imagen SEM del demultiplexor de rejilla de guía de onda curvada fabricado. b) Vista cercana de la región del deflector mostrando la rejilla, la losa SWG y la región de adaptación GRIN. c) Imagen SEM del cono de adaptación de entrada. d) Detalle de las guías de onda de salida.



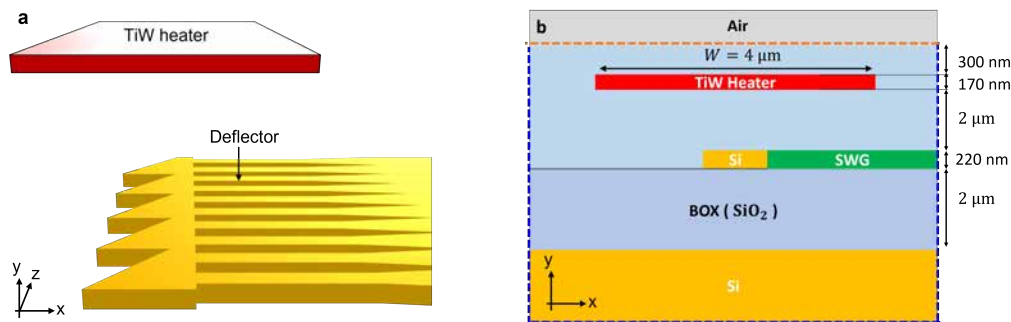
**Figure B.17:** Measured transmission spectra of the fabricated demultiplexer. The simulated spectra (shifted 8.5 nm) también se incluyen como curvas de puntos grises como referencia.

Hemos medido una pérdida de inserción tan baja como  $1.1 \pm 0.36$  dB. Se trata de una pérdida mínima récord para demultiplexores en plataformas thin-SOI totalmente grabadas [Melati2019; Tondini2017; Zou2017]. La diafonía es inferior a  $-25$  dB y la diafonía acumulada media de 3 dB, tal como se define en [Stanton2017], es de  $-23$  dB,

es decir, el valor más bajo registrado hasta ahora para un demultiplexor CWG y comparable a los dispositivos demultiplexores más avanzados en SOI. Los demultiplexores AWG de mejor rendimiento implementados en plataformas de silicio delgado totalmente grabadas alcanzan pérdidas de inserción de 2.9 dB y una diafonía superior a  $-24$  dB [Stanton2017], mientras que el mejor demultiplexor CWG anterior a este trabajo tiene una pérdida de inserción superior a 3 dB y una diafonía  $-25$  dB [Tondini2017].

### B.3.5 Sintonización térmica de demultiplexores de guía de onda curvada

Los demultiplexores de longitud de onda prácticos requieren una alineación precisa de la respuesta espectral con una rejilla de referencia (registro de la longitud de onda). Esto es especialmente difícil de conseguir en una plataforma thin-SOI, ya que las variaciones habituales de fabricación suelen inducir desplazamientos de la longitud de onda de varios nanómetros en la respuesta espectral del demultiplexor. Además, el índice de refracción del silicio depende en gran medida de la temperatura, por lo que la respuesta espectral se desplaza con la temperatura ambiente. En el caso de los demultiplexores de longitud de onda gruesa, la desalineación de la longitud de onda puede evitarse utilizando una banda de paso amplia y, preferiblemente, una respuesta plana. Esto asegura que la longitud de onda nominal permanezca dentro de la banda de paso del canal mientras la respuesta espectral se desplaza debido a las variaciones de fabricación y temperatura. Esta estrategia, aunque es eficaz para los sistemas de WDM gruesa, no es válida para WDM densa, que utiliza canales densamente espaciados con una banda de paso estrecha. En este caso, la sintonización activa es obligatoria. En las diferentes plataformas SOI, la sintonización se realiza normalmente utilizando el efecto termo-óptico del silicio.



**Figure B.18:** a) Arquitectura de calentamiento de la guía de ondas utilizada en esta tesis para sintonizar la respuesta espectral del CWG. b) Sección transversal del modelo 2D simplificado utilizado para la simulación de la transferencia de calor. Las líneas discontinuas representan los límites de la región de simulación. Las líneas discontinuas azules corresponden a una condición de contorno de temperatura constante, mientras que la línea discontinua naranja corresponde a una condición de contorno convectiva.

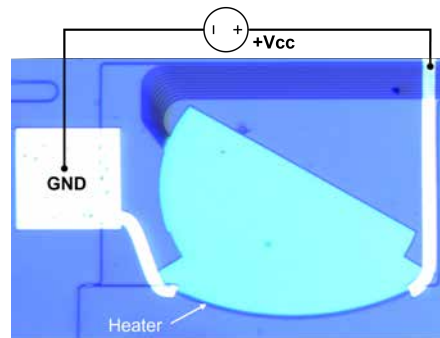
Utilizamos el ajuste térmico para controlar la respuesta espectral del demultiplexor CWG. Para ello, se coloca un calentador de aleación de titanio y wolframio (TiW) sobre la rejilla de la guía de onda curva, como se muestra en la Fig. B.18(a). Esta geometría se puede fabricar fácilmente en las plataformas de libre acceso, por ejemplo, Applied Nanotools [Applied Nanotools Inc2022]. Esta estrategia requiere calentar sólo una



pequeña región y permite la sintonización simultánea de todos los canales con un único elemento calentador. Como resultado, se consigue una alta eficiencia energética con una arquitectura sencilla.

#### B.3.5.1 Resultados experimentales

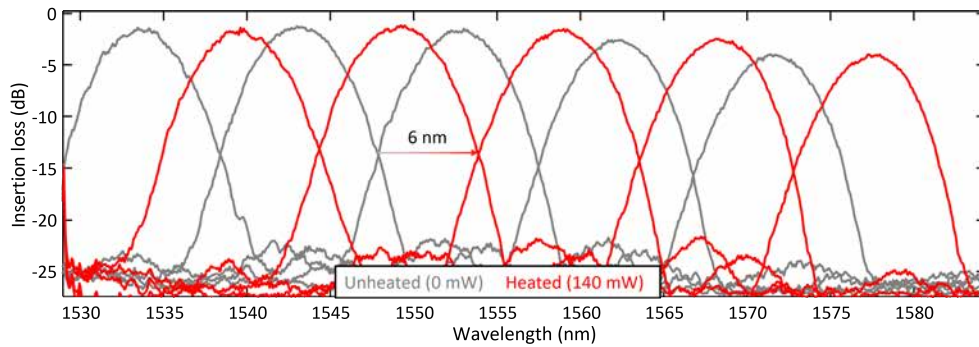
El demultiplexor sintonizable se fabricó utilizando el proceso de metalización de tres capas en Applied Nanotools [Applied Nanotools Inc2022]. La figura B.19 muestra una fotografía de microscopio óptico del dispositivo fabricado.



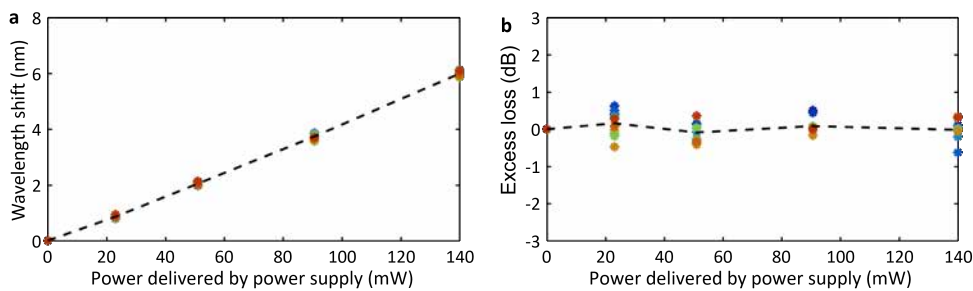
**Figure B.19:** Imagen de microscopio óptico que muestra un demultiplexor CWG fabricado con un calentador TiW y las conexiones eléctricas.

Para caracterizar el dispositivo, realizamos varias mediciones del espectro de transmisión óptica para diferentes potencias del calentador que van desde 0 mW hasta 140 mW, ver Fig. B.20. Observamos que, a medida que se calienta el dispositivo, el espectro de transmisión se desplaza con una penalización de pérdidas y distorsiones de la banda de paso insignificantes. El desplazamiento de la longitud de onda central y el exceso de pérdida en función de la potencia aplicada se muestran en la Fig. B.21. La eficiencia de sintonización medida es de  $\eta_{Th} = 42.9 \text{ nm/W}$ . Este es un valor récord para los demultiplexores basados en SOI. El valor más alto de eficiencia reportado hasta la fecha, hasta donde sabemos, es de 7 nm/W logrado por Tondini *et al.* usando un AWG [Tondini2017]. La eficiencia térmica puede incrementarse hasta un factor de  $\sim 20$  aplicando técnicas de aislamiento térmico como la eliminación local del silicio del sustrato [Masood2013].

Actualmente se está preparando un artículo en una revista sobre los resultados presentados en esta sección.



**Figure B.20:** Espectros de transmisión medidos del demultiplexor fabricado para dos valores de potencia eléctrica aplicada al calentador: 0 mW (gris) y 140 mW (rojo).



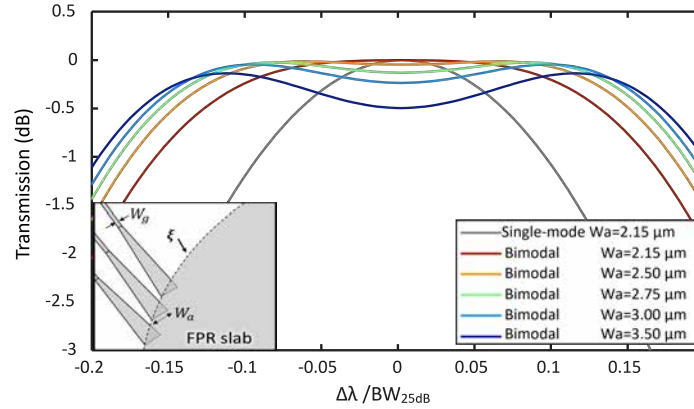
**Figure B.21:** a) Desplazamiento de la longitud de onda central y b) exceso de pérdida introducido por el calentamiento frente a la potencia suministrada al calentador. Los puntos de datos indican las mediciones de diferentes canales, mientras que las líneas negras discontinuas representan los datos promediados de los canales.

### B.3.6 Diseño con banda de paso plana

A menudo se prefieren los demultiplexores con banda de paso plana, ya que esta característica permite relajar los requisitos del control de la longitud de onda del láser [Cheben2006a]. El uso de guías de ondas de salida multimodo es una técnica sencilla, pero eficaz, para conseguir demultiplexores AWG de banda de paso plana sin un exceso de pérdidas sustancial [Smit1996].

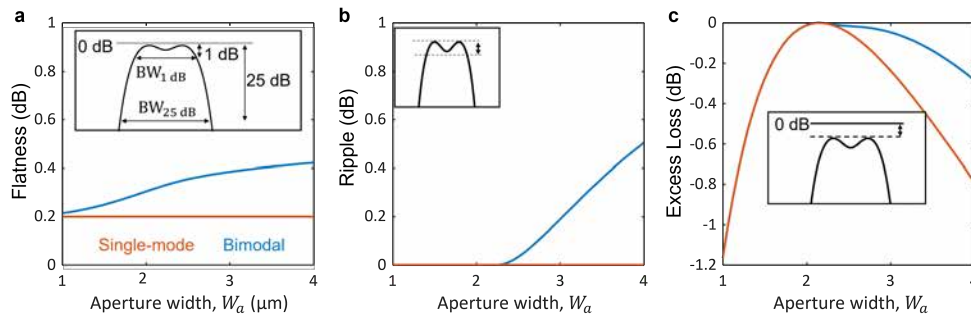
Aquí, utilizamos guías de onda de salida bimodales para implementar una banda de paso aplanada. Nos centramos en las mismas especificaciones de diseño que en la sección B.3.4. La anchura de las guías de onda de salida,  $W_g$ , se fijó en 700 nm, soportando los dos modos TE de menor orden. Un campo gaussiano con 0.75  $\mu\text{m}$  de radio modal, es decir, el mismo que el diseño de la sección B.3.4, se asume en la curva focal. La figura B.22 muestra la forma de la banda de paso para diferentes valores de la anchura de la apertura del receptor,  $W_a$ , cuando i) se considera el acoplamiento a los dos modos de menor orden (colores) y ii) sólo se considera el modo fundamental (gris). Se observa el aplanamiento de la respuesta al pasar del régimen monomodal (gris) al bimodal (rojo), siendo  $W_a$  el que determina la planitud, ondulación y pérdida de la banda de paso.

Para investigar más a fondo la influencia de la anchura de la apertura en la forma de la banda de paso, utilizamos la relación del ancho de banda de 1 dB y 25 dB



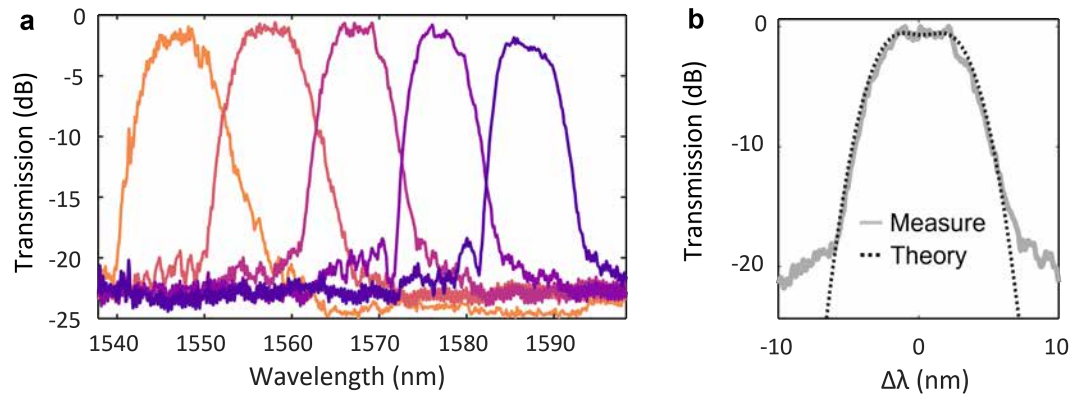
**Figure B.22:** Central channel passband for single-mode (grey) and bimodal outputs (coloured) for various widths of the receiver waveguide aperture  $W_a$  (as shown in the inset).

para cuantificar la planitud de la respuesta  $F = BW_{1\text{dB}}/BW_{25\text{dB}}$  [Fondeur2004]. La figura B.23(a) muestra la planitud calculada de la respuesta al variar la anchura de la apertura  $W_a$ . La ondulación y el exceso de pérdida se muestran en la Fig. B.23(b) y la Fig. B.23(c), respectivamente. Las curvas correspondientes para el caso monomodal también se han incluido como referencia (curvas naranjas). En el caso de las guías de onda receptoras bimodales (curvas azules), el aumento de la anchura  $W_a$  incrementa la planitud a expensas de un ligero aumento de la ondulación y del exceso de pérdidas. Aumentar  $W_a$  también requiere aumentar la separación de las guías de onda  $W_s$  para limitar la penalización por diafonía. Esto también da lugar a una mayor huella del dispositivo, ya que el radio de curvatura  $R$  se incrementa para la misma separación de canales. Fijamos  $W_a$  en  $2.75 \mu\text{m}$ , con lo que se consigue un buen equilibrio entre la mejora de la planitud, la reducción de la ondulación ( $< 0.1 \text{ dB}$ ) y el bajo exceso de pérdidas ( $< 0.1 \text{ dB}$ ), manteniendo al mismo tiempo un espacio compacto ( $W_s = 3.63 \mu\text{m}$  y  $R = 230 \mu\text{m}$ ).



**Figure B.23:** Características de la banda pasante del CWG para un diseño con salida bimodal (naranja) y una salida monomodal (gris). a) Planitud, b) ondulación y c) pérdida para un campo gaussiano de  $0.75 \mu\text{m}$  de radio modal [mode field radius (MFR)] sobre el círculo de Rowland.

Se fabricó y caracterizó el demultiplexor con respuesta aplanada. Los espectros medidos se muestran en la Fig. B.24(a). Las pérdidas experimentales oscilan entre 1.2 dB y 2 dB y la diafonía es inferior a -20 dB para todos los canales. La forma de la banda de paso medida está en buen acuerdo con la respuesta plana teórica, como se muestra en la Fig. B.24(b).



**Figure B.24:** a) Espectros medidos para el demultiplexor CWG con banda pasante plana. b) Banda pasante del canal central (medición y teoría).

### B.3.7 Conclusiones

Hemos demostrado que los demultiplexores CWG, que están basados en deflectores Bragg distribuidos, pueden implementarse con pérdidas de inserción tan bajas como 1 dB en una plataforma *thin-SOI*, lo que los convierte en una alternativa realista a las arquitecturas de demultiplexación convencionales. La baja pérdida se ha conseguido aplicando en el deflector la condición de haz único presentada en el capítulo anterior. También hemos propuesto una estrategia de sintonización eficaz y sencilla para los demultiplexores CWG mediante el calentamiento local de la región del deflector. Hemos demostrado una eficiencia de sintonización récord de 42.9 nm/W, sin precedentes en demultiplexores SOI. Por último, demostramos que esta arquitectura puede conseguir una respuesta plana de bajas pérdidas utilizando salidas bimodales. Creemos que este trabajo allana el camino hacia una mayor adopción de los demultiplexores CWG en la fotónica integrada.

## B.4 Deflector de Bragg distribuido como alimentador de antena

Las antenas ópticas en chip de gran superficie que pueden irradiar un haz orientable en el espacio libre fuera del chip son de gran interés para muchas aplicaciones, como la detección y distanciometría de luz [*light detection and ranging (LIDAR)*], las comunicaciones en el espacio libre y la tomografía de coherencia óptica [*optical coherence tomography (OCT)*] [Vermeulen2018]. La implementación de estas antenas en SOI suele requerir OPAs, que comprende varias rejillas difractivas, cada una alimentada individualmente y con una fase distinta controlada por un desfasador. El circuito de dirección  $y$  la red de alimentación suelen consumir una gran superficie de chip. Predominan dos arquitecturas: matrices 2D de rejillas compactas y matrices 1D de rejillas largas. A menudo se prefiere esta última, ya que aprovecha la difracción inherente a la longitud de onda de las rejillas, por lo que requiere un número considerablemente menor de desplazadores de fase y una red de alimentación más pequeña. Incluso en el caso de las matrices 1D, la matriz ocupada por la red de alimentación consume una gran parte de la huella total del circuito. Además, el espacio entre las antenas de rejilla lineales consecutivas que forman el conjunto 1D debe mantenerse por debajo de media longitud de onda para suprimir los lóbulos de rejilla. Sin embargo, esto rara vez es posible en los conjuntos 1D debido a la aparición del acoplamiento entre antenas vecinas cuando se reduce el espaciado.

Una alternativa novedosa y menos explorada para producir OPAs orientables es utilizar una única rejilla superficial de gran superficie alimentada por un haz orientable que se propaga en una guía de ondas de película, es decir, con confinamiento vertical 1D. La exploración en la dirección  $\theta$  se consigue principalmente utilizando la dependencia intrínseca del ángulo de radiación de la rejilla con la longitud de onda, mientras que la exploración en la dirección  $\phi$  puede obtenerse ajustando el ángulo de propagación en el plano del haz en la zona FPR. Como se muestra en el capítulo B.3, esto puede lograrse fácilmente utilizando un deflector de Bragg distribuido sintonizable térmicamente. Este concepto se visualiza en la figura B.25. Esta arquitectura de OPA, comparativamente sencilla, aprovecha una combinación de sintonía de longitud de onda y termo-óptica para proporcionar un direccionamiento 2D de haces altamente colimados sin lóbulos de rejilla mientras se utiliza un único calentador térmico.

### B.4.1 Principio de funcionamiento y análisis teórico

La figura B.25 muestra la geometría de una antena típica alimentada con un deflector de Bragg distribuido. El haz acoplado por un deflector a una guía de ondas de losa se utiliza para alimentar un acoplador de rejilla superficial fuera del chip. El ángulo de incidencia  $\varphi(\lambda, \Delta T) - \varphi_0$  del haz del deflector sobre la rejilla de superficie puede controlarse fácilmente mediante la variación de la temperatura  $\Delta T$  inducida por el calentador colocado encima del deflector. Así, la dirección bidimensional del haz se consigue mediante el control de la temperatura y la longitud de onda. La dirección  $(\theta, \phi)$  en la que se irradia el haz fuera del chip en función de la longitud de onda y la temperatura puede determinarse según las siguientes consideraciones: En primer lugar,

## Appendix B. Resumen en español

el ángulo de propagación del haz dentro de la guía de película de silicio  $\varphi(\lambda, \Delta T)$  se encuentra utilizando la ecuación de la rejilla:

$$\varphi(\lambda, \Delta T) = \arcsin \frac{n_{\text{DBD}}(\lambda, \Delta T) - \lambda / \Lambda_{\text{DBD}}}{n_s}, \quad (\text{B.26})$$

donde  $n_{\text{DBD}}$  es el índice del modo Floquet-Bloch del deflector de Bragg distribuido,  $\Lambda_{\text{DBD}}$  es la periodicidad y  $n_s$  es el índice efectivo del modo de losa de silicio.

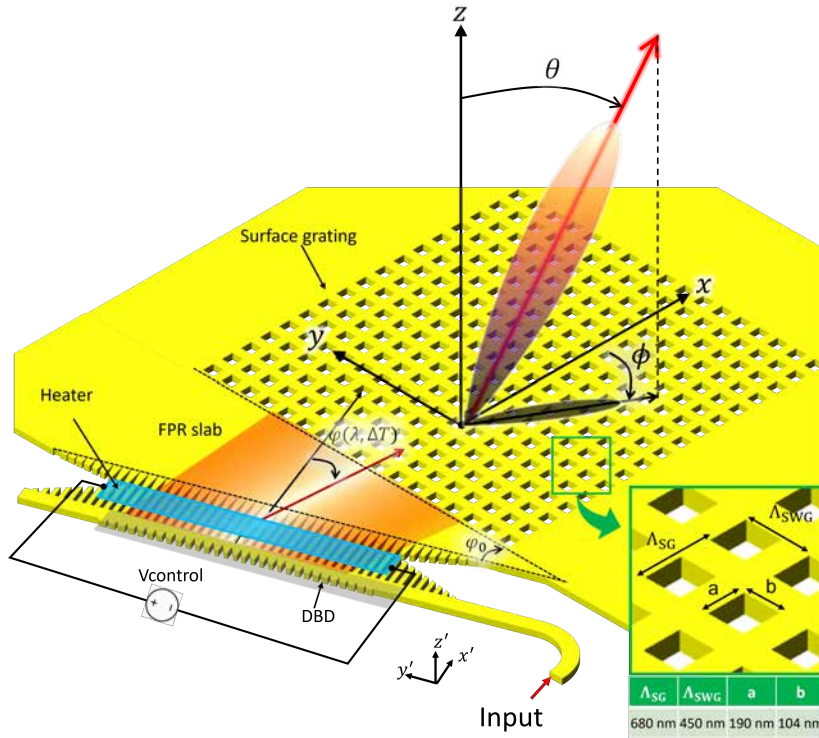
El ángulo de incidencia del haz difractado sobre la rejilla superficial viene dado por la diferencia  $\varphi(\lambda, \Delta T) - \varphi_0$ . El ángulo de incidencia es 0 para la longitud de onda central  $\lambda_0 = 1550$  nm.

Dado que la variación de fase a lo largo de la dirección  $y$  debe conservarse en la interfaz de entrada de la rejilla, el componente  $y$  del vector de onda del haz que se propaga en la guía de película de silicio debe coincidir con el del haz que se propaga en la rejilla de superficie. A partir de esta suposición, podemos encontrar fácilmente que el vector-onda  $\vec{k}_{-1} = k_x \hat{\mathbf{a}}_x + k_y \hat{\mathbf{a}}_y$  correspondiente al orden de difracción -1 dentro de la rejilla de superficie tiene las siguientes componentes:

$$\frac{k_y}{k_0} = n_s \sin(\varphi(\lambda, \Delta T) - \varphi_0), \quad (\text{B.27})$$

$$\frac{k_x}{k_0} = \sqrt{n_{\text{SG}}^2 - (k_y/k_0)^2} - \frac{\lambda}{\Lambda_{\text{SG}}}, \quad (\text{B.28})$$

donde  $\Lambda_{\text{SG}}$  es el periodo de la rejilla superficial en la dirección  $x$  y  $n_{\text{SG}}$  es el índice



**Figure B.25:** Esquema de un acoplador de rejilla superficial alimentado por un deflector de Bragg distribuido.

#### B.4. Deflector de Bragg distribuido como alimentador de antena

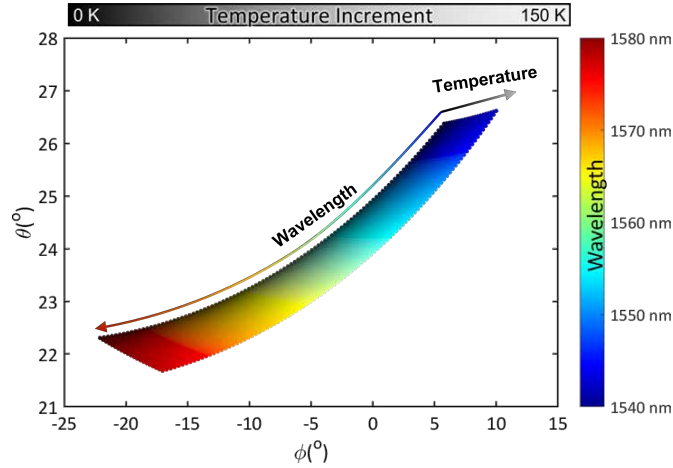
efectivo del modo Floquet-Bloch de la rejilla superficial, que suponemos isotrópico, es decir, idéntico para todas las direcciones de propagación.

Aplicando la condición de *phase-matching* con las ondas que se propagan por el aire, calculamos los ángulos de dirección de propagación  $(\theta, \phi)$  de los haces radiados por la rejilla superficial :

$$\theta = \arcsin \frac{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}}{k_0}, \quad (\text{B.29})$$

$$\phi = \arctan \frac{k_x}{k_y}. \quad (\text{B.30})$$

Las ecuaciones (B.29) y (B.30) se utilizaron para estimar el rango de dirección para el sistema mostrado en B.25. El sistema comprende un deflector construido con el mismo conjunto de elementos difractivos utilizada para el demultiplexor reportado en la sección B.3.4, y una rejilla superficial débil implementada por metamaterial SWG lateral siguiendo la estrategia descrita en [Halir2010]. La geometría de la rejilla superficial se muestra en la Fig. B.25.

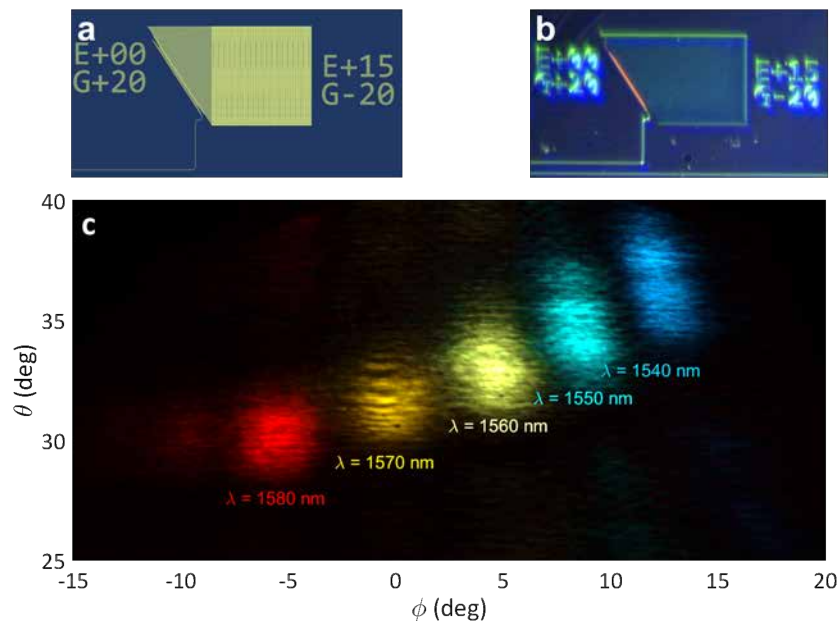


**Figure B.26:** Rango de dirección teórico de la rejilla de superficie alimentada por un deflector que se muestra en la Fig. B.25. Cada punto representa una posible dirección de radiación. El color indica la longitud de onda y el brillo la temperatura necesaria para irradiar el haz en una dirección específica.

El deflector de Bragg distribuido se modela mediante su índice efectivo ( $n_{\text{DBD}} = 2.55 @ \lambda = 1550 \text{ nm}$ ), su variación con la longitud de onda ( $\partial n_{\text{DBD}}/\partial \lambda = -0.8 \mu\text{m}^{-1}$ ) y el paso de la rejilla ( $\Lambda_{\text{DBD}} = 375 \text{ nm}$ ). El funcionamiento de la superficie de la rejilla, igualmente, se describe por su índice efectivo ( $n_{\text{SG}} = 2.7 @ \lambda = 1550 \text{ nm}$ ), su variación con la longitud de onda ( $\partial n_{\text{SG}}/\partial \lambda = -0.6 \mu\text{m}^{-1}$ ) y el paso de la rejilla en la dirección  $x$  ( $\Lambda_{\text{SG}} = 680 \text{ nm}$ ). Utilizando estos parámetros en las ecuaciones (B.29) y (B.30), y considerando una sintonía de longitud de onda que va de 1540 nm a 1580 nm y un incremento de temperatura de 0 K a 150 K, calculamos la dirección de radiación del haz. Los resultados se muestran en la Fig. B.26, consiguiendo un alcance angular de aproximadamente  $20^\circ \times 5^\circ$ .

### B.4.2 Verificación experimental

Hemos fabricado un dispositivo de prueba de concepto para evaluar la alimentación por rejilla superficial alimentada por deflector (véase la Fig. B.25). El dispositivo completo en el máscara GDS se muestra en la Fig. B.27(a) y la imagen de microscopio óptico del dispositivo fabricado se muestra en la Fig. B.27(b). No se incluyó ningún calentador, por lo que no se probó el control de la temperatura mientras que sí se evaluó la capacidad de control de la longitud de onda. La distribución de la luz en el campo lejano se midió con un sistema de cámaras y lentes infrarrojas, como se describe en [Ginel-Moreno2021]. Esta medición específica fue realizada por el Sr. Pablo Ginel-Moreno, candidato a doctor en nuestro grupo. Los patrones de campo lejano medidos se muestran en la Fig. B.27(c) para cinco longitudes de onda diferentes. Se observa claramente la dirección del haz inducida por la longitud de onda.



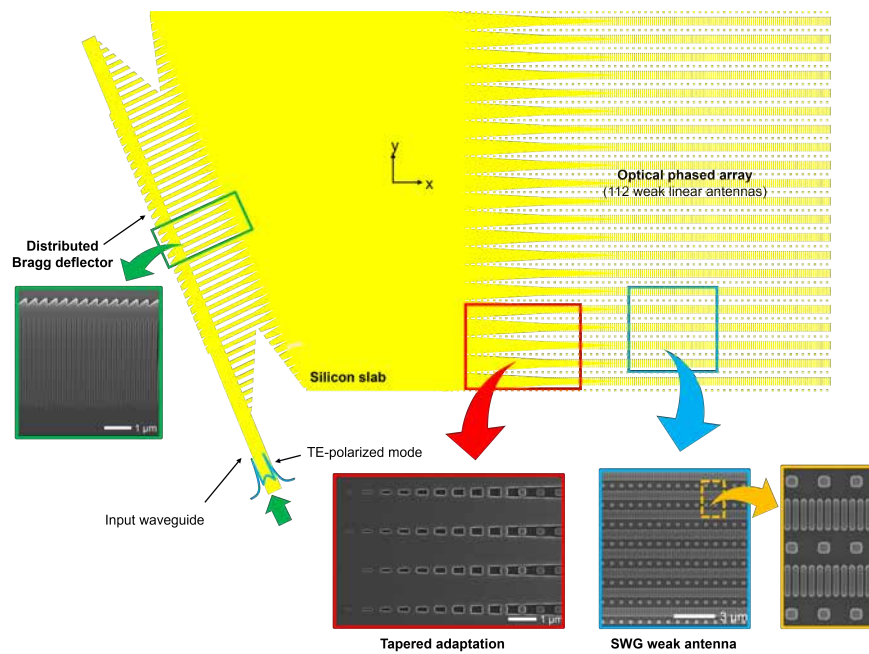
**Figure B.27:** a) Vista cercana de la rejilla de superficie alimentada por el deflector en el archivo de diseño GDS enviado a la fundición. b) Imagen de microscopio óptico del dispositivo fabricado. c) Distribución de intensidad de campo lejano medida en función de  $\theta$  y  $\phi$  para cinco longitudes de onda que van de 1540 nm a 1580 nm.

En nuestro grupo de investigación se llevará a cabo una evaluación adicional de este esquema de alimentación propuesto como parte de la investigación de doctorado de Pablo Ginel-Moreno, como parte de la investigación de una arquitectura alternativa en la que la rejilla de superficie se sustituye por un conjunto de antenas lineales débiles estrechamente espaciadas, como se muestra en la Fig. B.28. Las antenas lineales débiles comprenden una guía de ondas SWG cargada lateralmente con bloques de silicio difractivos [Ginel-Moreno2020; Ginel-Moreno2021]. Aquí sólo introducimos brevemente los resultados de esta arquitectura, ya que consideramos que proporciona una validación experimental adicional de la técnica original propuesta en este trabajo. Para una descripción detallada, remitimos al lector a nuestra reciente publicación. [Ginel-Moreno2022]

Los resultados de las mediciones de campo lejano se muestran en la Fig. B.29. Se

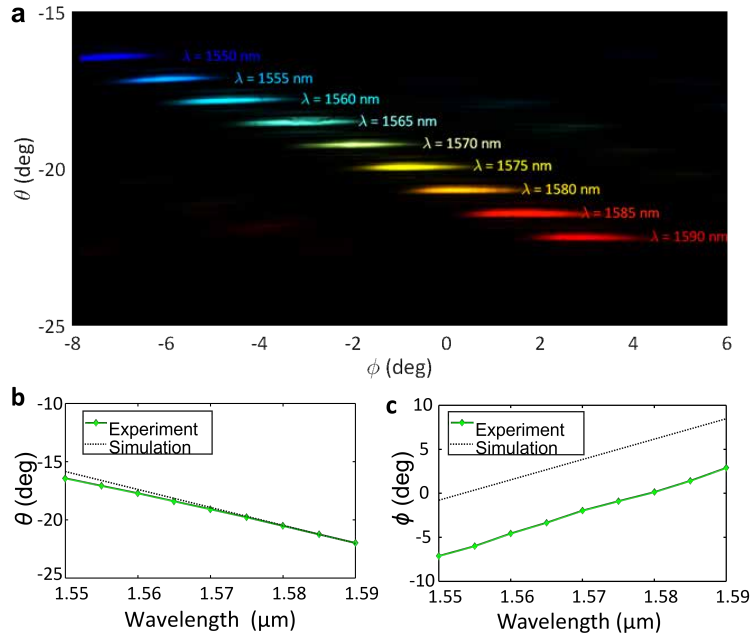


#### B.4. Deflector de Bragg distribuido como alimentador de antena



**Figure B.28:** Esquema de un OPA alimentado por un deflector y formado por un conjunto de antenas lineales débiles. Los recuadros muestran imágenes SEM de diferentes partes del dispositivo fabricado.

observa una buena concordancia entre la teoría y el experimento, lo que demuestra la viabilidad de la arquitectura de la antena alimentada por deflectores. Creemos que los resultados presentados en este capítulo son la base de un nuevo tipo de antena orientable que aprovecha los deflectores de Bragg distribuidos tanto para la alimentación de la antena como para las funciones de orientación del haz.



**Figure B.29:** a) Distribución de campo lejano medida en función de  $\phi$  y  $\theta$  para diferentes longitudes de onda que van desde 1540 nm a 1590 nm, para la arquitectura de antena débil mostrada en la Fig. B.28. b) Ángulo de emisión vertical medido y c) ángulo de emisión azimutal en función de la longitud de onda. Se incluyen los resultados de la simulación para su comparación.

## B.5 Conclusiones

El objetivo de esta tesis es desarrollar dispositivos prácticos de bajas pérdidas basados en DBD para la plataforma SOI. Los dispositivos basados en DBD publicados anteriormente sufrían pérdidas significativas que dificultaban su uso práctico. En este trabajo, hemos identificado el origen de estas pérdidas y hemos conseguido mitigarlas con éxito. De este modo, hemos demostrado varios dispositivos nuevos con un rendimiento excelente, más allá del estado del arte.

En primer lugar, investigamos, mediante el análisis del modo Floquet-Bloch, el origen de las elevadas pérdidas observadas en los dispositivos basados en deflectores de los que se ha informado anteriormente. Descubrimos que estas pérdidas se deben al acoplamiento de la radiación fuera del chip, regido por la condición de coincidencia de fase. Mientras se cumpla esta última, la radiación fuera del chip no puede reducirse por debajo de 1.8 dB, lo cual es inadecuado para la mayoría de las aplicaciones prácticas. Abordamos este problema de raíz y propusimos frustrar la coincidencia de fase imponiendo la condición de haz único. Demostramos que cuando se cumple esta última, se puede conseguir un rendimiento casi sin pérdidas. Basándonos en este principio fundamental, se diseñó un expansor de haz basado en DBD, en el que la pérdida de radiación fuera del chip se redujo a un nivel sin precedentes de 0.15 dB.

En segundo lugar, diseñamos un DBD de bajas pérdidas para su aplicación en un demultiplexor CWG. Nuestros resultados experimentales muestran que esta arquitectura es especialmente ventajosa para demultiplexores con un número intermedio de canales (8-32 canales con un espaciado de 5-20 nm), como se requiere en las aplicaciones

de comunicación de datos. Demostramos un demultiplexor grueso con 8 canales espaciados 10 nm y la longitud de onda central de 1550 nm. Los resultados experimentales mostraron bajas pérdidas (1 dB) y diafonía ( $-25$  dB) que superan el estado del arte. Como resultado, demostramos que el demultiplexor CWG es una alternativa competitiva a los dispositivos multiplexores/demultiplexores convencionales, como los AWGs o las rejillas de guía de onda Echelle. También se demostró un demultiplexor CWG de banda pasante plana y bajas pérdidas. Los resultados experimentales mostraron un aplanamiento significativo de la banda pasante manteniendo bajas pérdidas (1 – 2 dB) y baja diafonía ( $< -20$  dB ).

Se ha propuesto, diseñado y demostrado experimentalmente una variante sintonizable del demultiplexor CWG de bajas pérdidas. La sintonización se implementó en CWGs calentando localmente la rejilla de la guía de onda. El demultiplexor fabricado en CWG muestra una eficiencia de sintonización de 43 nm/W que es casi seis veces mayor que los mejores valores reportados en la literatura [Tondini2017]. Los CWGs sintonizables en SOI no sólo consumen menos energía para el mismo desplazamiento espectral en comparación con los demultiplexores convencionales, sino que lo hacen prácticamente sin exceso de pérdida o degradación de la forma de la respuesta. En general, creemos que los demultiplexores CWG pueden tener un impacto significativo en los futuros diseños de transceptores de comunicación de datos.

Por último, esta tesis también ha explorado el uso de un deflector como elemento de alimentación de una antena óptica implementada por una rejilla de superficie de gran área. El deflector no sólo permite una expansión eficiente y compacta del haz, sino que también permite una dirección eficiente del haz en dos dimensiones. Colocando un calentador sobre el deflector, el haz radiado puede dirigirse mediante el control de la temperatura y la longitud de onda, lo que evita la necesidad de utilizar desfases específicos. En efecto, la función de cambio de fase está integrada directamente en el deflector. Aunque el campo de visión logrado por esta arquitectura es limitado ( $\sim 20^\circ \times 5^\circ$ ), su simplicidad, compacidad y eficiencia térmica la hacen especialmente prometedora para aplicaciones con un rango de dirección comparativamente pequeño.

El trabajo realizado en esta tesis supera el principal inconveniente que había limitado una mayor adopción de los dispositivos basados en DBD, a saber, la pérdida de radiación fuera del chip. Esperamos que nuestro trabajo despierte un renovado interés por esta interesantísima arquitectura de dispositivos y que dé lugar a un renovado interés de investigación en este campo, que conduzca a nuevas e interesantes aplicaciones.

## B.6 Bibliografía

- [Aalto2006] T. Aalto, K. Solehmainen, M. Harjanne, M. Kapulainen, and P. Heimala. “Low-Loss Converters between Optical Silicon Waveguides of Different Sizes and Types”. In: *IEEE Photonics Technology Letters* 18.5 (Mar. 2006), pp. 709–711. ISSN: 1941-0174. DOI: [10.1109/LPT.2006.871150](https://doi.org/10.1109/LPT.2006.871150).
- [Aalto2015] T. Aalto, M. Harjanne, S. Ylinen, M. Kapulainen, T. Vehmas, and M. Cherchi. “Total Internal Reflection Mirrors with Ultra-Low Losses in 3  $\mu\text{m}$  Thick SOI Waveguides”. In: *Silicon Photonics X. Silicon Photonics X*. Vol. 9367. SPIE, Feb. 27, 2015, pp. 39–47. DOI: [10.1117/12.2079748](https://doi.org/10.1117/12.2079748).

- [Aalto2019] T. Aalto, M. Cherchi, M. Harjanne, S. Bhat, P. Heimala, F. Sun, M. Kapulainen, T. Hassinen, and T. Vehmas. “Open-Access 3- $\mu\text{m}$  SOI Waveguide Platform for Dense Photonic Integrated Circuits”. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 25.5 (Sept. 2019), pp. 1–9. ISSN: 1558-4542. DOI: [10.1109/JSTQE.2019.2908551](https://doi.org/10.1109/JSTQE.2019.2908551).
- [Allen2019] M. B. Allen and E. L. Isaacson. *Numerical Analysis for Applied Science*. Second edition. Pure and Applied Mathematics. Hoboken, NJ: Wiley, 2019. 1 p. ISBN: 978-1-119-24565-0.
- [Almeida2003] V. R. Almeida, R. R. Panepucci, and M. Lipson. “Nanotaper for Compact Mode Conversion”. In: *Opt. Lett.*, *OL* 28.15 (Aug. 1, 2003), pp. 1302–1304. ISSN: 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.28.001302](https://doi.org/10.1364/OL.28.001302).
- [Alonso-Ramos2010] C. Alonso-Ramos, A. Ortega-Moñux, I. Molina-Fernández, P. Cheben, L. Zavargo-Peche, and R. Halir. “Efficient Fiber-to-Chip Grating Coupler for Micrometric SOI Rib Waveguides”. In: *Opt. Express* 18.14 (July 5, 2010), p. 15189. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.18.015189](https://doi.org/10.1364/OE.18.015189).
- [AMF2022] AMF. *Advanced Micro Foundry Brochure*. 2022. URL: <https://www.advmf.com/wp-content/uploads/2019/08/AMF-Brochure-Web.pdf> (visited on 03/28/2022).
- [Andersen2021] U. L. Andersen. “Photonic Chip Brings Optical Quantum Computers a Step Closer”. In: *Nature* 591.7848 (7848 Mar. 2021), pp. 40–41. DOI: [10.1038/d41586-021-00488-z](https://doi.org/10.1038/d41586-021-00488-z).
- [Applied Nanotools Inc2022] Applied Nanotools Inc. *Applied Nanotools Inc.* 2022. URL: <https://www.appliednt.com/> (visited on 03/29/2022).
- [Barrett2021] B. Barrett. “Mobileye Puts Lidar on a Chip—and Helps Map Intel’s Future”. In: *Wired* (Nov. 1, 2021). ISSN: 1059-1028. URL: <https://www.wired.com/story/mobileye-lidar-on-a-chip-intel/> (visited on 01/12/2022).
- [Benedikovic2017] D. Benedikovic, C. Alonso-Ramos, D. Pérez-Galacho, S. Guerber, V. Vakarín, G. Marcaud, X. Le Roux, E. Cassan, D. Marris-Morini, P. Cheben, F. Boeuf, C. Baudot, and L. Vivien. “L-Shaped Fiber-Chip Grating Couplers with High Directionality and Low Reflectivity Fabricated with Deep-UV Lithography”. In: *Optics Letters* 42.17 (Sept. 2017), pp. 3439–3442. ISSN: 0146-9592. DOI: [10.1364/OL.42.003439](https://doi.org/10.1364/OL.42.003439).
- [Benedikovic2019] D. Benedikovic, L. Viroto, G. Aubin, F. Amar, B. Szelag, B. Karakus, J.-M. Hartmann, C. Alonso-Ramos, X. L. Roux, P. Crozat, E. Cassan, D. Marris-Morini, C. Baudot, F. Boeuf, J.-M. Fédéli, C. Kopp, and L. Vivien. “25 Gbps Low-Voltage Hetero-Structured Silicon-Germanium Waveguide Pin Photodetectors for Monolithic on-Chip Nanophotonic Architectures”. In: *Photon. Res.* 7.4 (Apr. 1, 2019), pp. 437–444. ISSN: 2327-9125. DOI: [10.1364/PRJ.7.000437](https://doi.org/10.1364/PRJ.7.000437).
- [Billah2018] M. R. Billah, M. Blaicher, T. Hoose, P.-I. Dietrich, P. Marin-Palomo, N. Lindenmann, A. Nestic, A. Hofmann, U. Troppenz, M. Moehrle, S. Randel, W. Freude, and C. Koos. “Hybrid Integration of Silicon Photonics Circuits and InP Lasers by Photonic Wire Bonding”. In: *Optica*, *OPTICA* 5.7 (July 20, 2018), pp. 876–883. ISSN: 2334-2536. DOI: [10.1364/OPTICA.5.000876](https://doi.org/10.1364/OPTICA.5.000876).
- [Blumenthal2018] D. J. Blumenthal, R. Heideman, D. Geuzebroek, A. Leinse, and C. Roeloffzen. “Silicon Nitride in Silicon Photonics”. In: *Proc. IEEE* 106.12 (Dec. 2018), pp. 2209–2231. ISSN: 0018-9219, 1558-2256. DOI: [10.1109/JPROC.2018.2861576](https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2861576).
- [Bock2008] P. J. Bock, P. Cheben, A. Delâge, J. H. Schmid, D.-X. Xu, S. Janz, and T. J. Hall. “Demultiplexer with Blazed Waveguide Sidewall Grating and Sub-Wavelength Grating Structure”. In: *Opt. Express* 16.22 (Oct. 27, 2008), p. 17616. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.16.017616](https://doi.org/10.1364/OE.16.017616).

- [Bock2009] P. J. Bock, P. Cheben, J. H. Schmid, A. Delâge, D.-X. Xu, S. Janz, and T. J. Hall. “Sub-Wavelength Grating Mode Transformers in Silicon Slab Waveguides”. In: *Opt. Express* 17.21 (Oct. 12, 2009), p. 19120. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.17.019120](https://doi.org/10.1364/OE.17.019120).
- [Bock2012] P. J. Bock, P. Cheben, J. H. Schmid, A. V. Velasco, A. Delâge, S. Janz, D.-X. Xu, J. Lapointe, T. J. Hall, and M. L. Calvo. “Demonstration of a Curved Sidewall Grating Demultiplexer on Silicon”. In: *Opt. Express* 20.18 (Aug. 27, 2012), p. 19882. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.20.019882](https://doi.org/10.1364/OE.20.019882).
- [Boeuf2018] F. Boeuf. *Silicon Photonics : Industrial Reality and Future Evolutions*. STMICROELECTRONICS, 2018. URL: [https://www.leti-cea.com/cea-tech/leti/english/Documents/pres-WS-LID-2018/Photonic/01\\_silicon\\_Photonics\\_overview\\_LETI\\_DAYS\\_2018.pdf](https://www.leti-cea.com/cea-tech/leti/english/Documents/pres-WS-LID-2018/Photonic/01_silicon_Photonics_overview_LETI_DAYS_2018.pdf).
- [Bogaerts2010] W. Bogaerts, S. K. Selvaraja, P. Dumon, J. Brouckaert, K. De Vos, D. Van Thourhout, and R. Baets. “Silicon-on-Insulator Spectral Filters Fabricated With CMOS Technology”. In: *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* 16.1 (2010), pp. 33–44. ISSN: 1077-260X. DOI: [10.1109/JSTQE.2009.2039680](https://doi.org/10.1109/JSTQE.2009.2039680).
- [Bogaerts2018] W. Bogaerts and L. Chrostowski. “Silicon Photonics Circuit Design: Methods, Tools and Challenges”. In: *Laser & Photonics Reviews* 12.4 (Apr. 2018), p. 1700237. ISSN: 18638880. DOI: [10.1002/lpor.201700237](https://doi.org/10.1002/lpor.201700237).
- [Camacho-Aguilera2012] R. E. Camacho-Aguilera, Y. Cai, N. Patel, J. T. Bessette, M. Romagnoli, L. C. Kimerling, and J. Michel. “An Electrically Pumped Germanium Laser”. In: *Opt. Express, OE* 20.10 (May 7, 2012), pp. 11316–11320. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.20.011316](https://doi.org/10.1364/OE.20.011316).
- [CEA-Leti2021] CEA-Leti. *Silicon Photonics*. CEA/Leti (english). Mar. 12, 2021. URL: <https://www.cea.fr/cea-tech/leti/english/Pages/Applied-Research/Technology-Fields/Silicon-Photonics.aspx> (visited on 03/24/2022).
- [Cheben2006a] P. Cheben, S. Janz, D.-X. Xu, B. Lamontagne, A. Delage, and S. Tanev. “A Broad-Band Waveguide Grating Coupler with a Subwavelength Grating Mirror”. In: *IEEE Photonics Technology Letters* 18.1 (Jan. 2006), pp. 13–15. ISSN: 1941-0174. DOI: [10.1109/LPT.2005.860037](https://doi.org/10.1109/LPT.2005.860037).
- [Cheben2006b] P. Cheben, D.-X. Xu, S. Janz, and A. Densmore. “Subwavelength Waveguide Grating for Mode Conversion and Light Coupling in Integrated Optics”. In: *Opt. Express* 14.11 (2006), p. 4695. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.14.004695](https://doi.org/10.1364/OE.14.004695).
- [Cheben2007] P. Cheben. “Wavelength Dispersive Planar Waveguide Devices: Echelle and Arrayed Waveguide Gratings”. In: *Optical Waveguides: From Theory to Applied Technologies*. Ed. by M. L. Calvo and V. Lakshminarayanan. 1st ed. CRC Press, 2007, pp. 173–230. ISBN: 978-1-315-22134-2. DOI: [10.1201/9781315221342-5](https://doi.org/10.1201/9781315221342-5).
- [Cheben2010] P. Cheben, P. J. Bock, J. H. Schmid, J. Lapointe, S. Janz, D.-X. Xu, A. Densmore, A. Delâge, B. Lamontagne, and T. J. Hall. “Refractive Index Engineering with Subwavelength Gratings for Efficient Microphotonic Couplers and Planar Waveguide Multiplexers”. In: *Opt. Lett., OL* 35.15 (Aug. 1, 2010), pp. 2526–2528. ISSN: 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.35.002526](https://doi.org/10.1364/OL.35.002526).
- [Cheben2015] P. Cheben, J. H. Schmid, S. Wang, D.-X. Xu, M. Vachon, S. Janz, J. Lapointe, Y. Painchaud, and M.-J. Picard. “Broadband Polarization Independent Nanophotonic Coupler for Silicon Waveguides with Ultra-High Efficiency”. In: *Opt. Express* 23.17 (Aug. 24, 2015), p. 22553. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.23.022553](https://doi.org/10.1364/OE.23.022553).

## Appendix B. Resumen en español

---

- [Cheben2018] P. Cheben, R. Halir, J. H. Schmid, H. A. Atwater, and D. R. Smith. “Subwavelength Integrated Photonics”. In: *Nature* 560.7720 (Aug. 2018), pp. 565–572. ISSN: 0028-0836, 1476-4687. DOI: [10.1038/s41586-018-0421-7](https://doi.org/10.1038/s41586-018-0421-7).
- [Cheben2019] P. Cheben, J. Čtyroký, J. H. Schmid, S. Wang, J. Lapointe, J. G. Wangüemert-Pérez, Í. Molina-Fernández, A. Ortega-Moñux, R. Halir, D. Melati, D. Xu, S. Janz, and M. Dado. “Bragg Filter Bandwidth Engineering in Subwavelength Grating Metamaterial Waveguides”. In: *Opt. Lett.*, *OL* 44.4 (Feb. 15, 2019), pp. 1043–1046. ISSN: 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.44.001043](https://doi.org/10.1364/OL.44.001043).
- [Chen2018] X. Chen, M. M. Milosevic, S. Stanković, S. Reynolds, T. D. Bucio, K. Li, D. J. Thomson, F. Gardes, and G. T. Reed. “The Emergence of Silicon Photonics as a Flexible Technology Platform”. In: *Proceedings of the IEEE* 106.12 (Dec. 2018), pp. 2101–2116. ISSN: 1558-2256. DOI: [10.1109/JPROC.2018.2854372](https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2854372).
- [Cherchi2013] M. Cherchi, S. Ylino, M. Harjanne, M. Kapulainen, and T. Aalto. “Dramatic Size Reduction of Waveguide Bends on a Micron-Scale Silicon Photonic Platform”. In: *Opt. Express*, *OE* 21.15 (July 29, 2013), pp. 17814–17823. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.21.017814](https://doi.org/10.1364/OE.21.017814).
- [Cisco Systems Inc2021a] Cisco Systems Inc. *Cisco Completes Acquisition of Acacia Communications, Inc.* Cisco. Mar. 1, 2021. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/about/corporate-strategy-office/acquisitions/acacia.html> (visited on 07/15/2021).
- [Cisco Systems Inc2021b] Cisco Systems, Inc. *Optical Transceivers, Pluggables.* Cisco. 2021. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/interfaces-modules/transceiver-modules/index.html> (visited on 06/28/2021).
- [CompoundTek2022] CompoundTek. *Silicon Photonics Solutions.* 2022. URL: <https://compoundtek.com/our-solutions/> (visited on 03/29/2022).
- [Damião2015] A. Damião. *Filter Diagonalization Method - Matlab.* 2015. URL: <https://github.com/adamiao/filter-diagonalization-method-matlab>.
- [Davis2004] R. Davis, W. Long, C.-J. Wang, T. Lam, J. Ho, P. Nachman, J. Poylio, O. Mishechkin, and M. Fallahi. “Distributed Bragg Deflectors Fabricated in Sol-Gel Based Waveguides”. In: *IEEE Photonics Technology Letters* 16.2 (Feb. 2004), pp. 464–466. ISSN: 1941-0174. DOI: [10.1109/LPT.2003.821255](https://doi.org/10.1109/LPT.2003.821255).
- [Doerr2018] C. Doerr and L. Chen. “Silicon Photonics in Optical Coherent Systems”. In: *Proc. IEEE* 106.12 (Dec. 2018), pp. 2291–2301. ISSN: 0018-9219, 1558-2256. DOI: [10.1109/JPROC.2018.2866391](https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2866391).
- [EUROPRACTICE2022] EUROPRACTICE. *EUROPRACTICE Photonics Portfolio.* 2022. URL: <https://euopractice-ic.com/technologies/photonics/> (visited on 03/29/2022).
- [Fahrenkopf2019] N. M. Fahrenkopf, C. McDonough, G. L. Leake, Z. Su, E. Timurdogan, and D. D. Coolbaugh. “The AIM Photonics MPW: A Highly Accessible Cutting Edge Technology for Rapid Prototyping of Photonic Integrated Circuits”. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 25.5 (Sept. 2019), pp. 1–6. ISSN: 1558-4542. DOI: [10.1109/JSTQE.2019.2935698](https://doi.org/10.1109/JSTQE.2019.2935698).
- [Fondeur2004] B. Fondeur, A. Sala, H. Yamada, R. Brainard, E. Egan, S. Thekdi, N. Gopinathan, D. Nakamoto, and A. Vaidyanathan. “Ultrawide AWG With Hyper-Gaussian Profile”. In: *IEEE Photon. Technol. Lett.* 16.12 (Dec. 2004), pp. 2628–2630. ISSN: 1041-1135. DOI: [10.1109/LPT.2004.836746](https://doi.org/10.1109/LPT.2004.836746).

- [Fu2014] Y. Fu, T. Ye, W. Tang, and T. Chu. “Efficient Adiabatic Silicon-on-Insulator Waveguide Taper”. In: *Photon. Res.* 2.3 (June 1, 2014), A41. ISSN: 2327-9125. DOI: [10.1364/PRJ.2.000A41](https://doi.org/10.1364/PRJ.2.000A41).
- [Gardes2009] F. Gardes, A. Brimont, P. Sanchis, G. Rasigade, D. Marris-Morini, L. O’Faolain, F. Dong, J. Fedeli, P. Dumon, L. Vivien, T. Krauss, G. Reed, and J. Martí. “High-Speed Modulation of a Compact Silicon Ring Resonator Based on a Reverse-Biased Pn Diode”. In: *Optics Express* 17.24 (2009), pp. 21986–21991. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.17.021986](https://doi.org/10.1364/OE.17.021986).
- [Ginel-Moreno2020] P. Ginel-Moreno, D. Pereira-Martín, A. Hadij-ElHouati, W. N. Ye, D. Melati, D.-X. Xu, S. Janz, A. Ortega-Moñux, J. G. Wangüemert-Pérez, R. Halir, Í. Molina-Fernández, J. H. Schmid, and P. Cheben. “Highly Efficient Optical Antenna with Small Beam Divergence in Silicon Waveguides”. In: *Opt. Lett.* 45.20 (Oct. 15, 2020), p. 5668. ISSN: 0146-9592, 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.404012](https://doi.org/10.1364/OL.404012).
- [Ginel-Moreno2021] P. Ginel-Moreno, A. Sánchez-Postigo, J. de-Oliva-Rubio, A. Hadij-ElHouati, W. N. Ye, J. G. Wangüemert-Pérez, Í. Molina-Fernández, J. H. Schmid, P. Cheben, and A. Ortega-Moñux. “Millimeter-Long Metamaterial Surface-Emitting Antenna in the Silicon Photonics Platform”. In: *Opt. Lett., OL* 46.15 (Aug. 1, 2021), pp. 3733–3736. ISSN: 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.431983](https://doi.org/10.1364/OL.431983).
- [Ginel-Moreno2022] P. Ginel-Moreno, A. Hadij-ElHouati, A. Sánchez-Postigo, J. G. Wangüemert-Pérez, Í. Molina-Fernández, J. H. Schmid, P. Cheben, and A. Ortega-Moñux. “On-Chip Metamaterial Antenna Array with Distributed Bragg Deflector for Generation of Collimated Steerable Beams”. In: *Laser & Photonics Reviews* (July 3, 2022), p. 2200164. ISSN: 1863-8880, 1863-8899. DOI: [10.1002/lpor.202200164](https://doi.org/10.1002/lpor.202200164).
- [González-Andrade2021] D. González-Andrade, R. F. de Cabo, J. Vilas, I. Olivares, A. Dias, J. M. Luque-González, J. G. Wangüemert-Pérez, A. Ortega-Moñux, Í. Molina-Fernández, R. Halir, P. Cheben, and A. V. Velasco. “Mode Converter and Multiplexer With a Subwavelength Phase Shifter for Extended Broadband Operation”. In: *IEEE Photonics Technology Letters* 33.22 (Nov. 2021), pp. 1262–1265. ISSN: 1941-0174. DOI: [10.1109/LPT.2021.3116439](https://doi.org/10.1109/LPT.2021.3116439).
- [Greene2007] K. Greene. *Silicon Photonics Comes to Market*. MIT Technology Review. Aug. 16, 2007. URL: <https://www.technologyreview.com/2007/08/16/224040/silicon-photonics-comes-to-market/> (visited on 07/15/2021).
- [Guerber2020] S. Guerber, C. A. Alonso-Ramos, X. Le Roux, N. Vulliet, E. Cassan, D. Marris-Morini, F. Boeuf, and L. Vivien. “Polarization Independent and Temperature Tolerant AWG Based on a Silicon Nitride Platform”. In: *Opt. Lett.* 45.23 (Dec. 1, 2020), p. 6559. ISSN: 0146-9592, 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.411332](https://doi.org/10.1364/OL.411332).
- [Hadij-ElHouati2019a] A. Hadij-ElHouati, P. Cheben, A. Ortega-Moñux, J. G. Wangüemert-Pérez, R. Halir, J. H. Schmid, and Í. Molina-Fernández. “Diffraction Sidewall Grating Coupler: Towards 2D Free-Space Optics on Chip”. In: *Integrated Optics: Design, Devices, Systems, and Applications v.* Ed. by P. Cheben, J. Čtyroký, and I. Molina-Fernández. Vol. 11031. International Society for Optics and Photonics. SPIE, 2019, pp. 78–86. DOI: [10.1117/12.2522471](https://doi.org/10.1117/12.2522471).
- [Hadij-ElHouati2019b] A. Hadij-ElHouati, P. Cheben, A. Ortega-Moñux, J. G. Wangüemert-Pérez, R. Halir, J. H. Schmid, and Í. Molina-Fernández. “Distributed Bragg Deflector Coupler for On-Chip Shaping of Optical Beams”. In: *Opt. Express* 27.23 (Nov. 11, 2019), pp. 33180–33193. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.27.033180](https://doi.org/10.1364/OE.27.033180).

- [Hadij-ElHouati2020a] A. Hadij-ElHouati, R. Halir, A. Ortega-Moñux, J. G. Wangüemert-Pérez, H. Podmore, J. H. Schmid, P. Cheben, and I. Molina-Fernández. “Metamaterial Engineered C+L Band 90° Hybrid with 150 Nm Feature Size”. In: Sept. 28, 2020. URL: <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/20512> (visited on 12/22/2021).
- [Hadij-ElHouati2020b] A. Hadij-ElHouati, R. Halir, A. Ortega-Moñux, J. G. Wangüemert-Pérez, H. Podmore, J. H. Schmid, P. Cheben, and Í. Molina-Fernández. “Híbrido de 90° de Banda Ultra-Ancha, Basado En Tecnología Sub-Longitud de Onda, Compatible Con Fabricación Litográfica En La Plataforma Fotónica de Silicio”. In: XXXV Simposio Nacional de La Unión Científica Internacional de Radio (URSI). Virtual Conference, Sept. 4, 2020.
- [Hadij-ElHouati2020c] A. Hadij-ElHouati, I. Molina-Fernández, R. Halir, J. G. Wangüemert-Pérez, and A. Ortega-Moñux. “Deflector Lateral de Haz Único, Multiplexor/Demultiplexor y Dispositivo Alimentador de Antena Óptica Que Incorporan El Deflector, y Métodos Que Los Utilizan”. Pat. Spain patent application P202031204 (Spain). 2020. URL: <https://umapatent.uma.es/es/patent/deflector-lateral-de-haz-unico-control-de-dic3d0/>.
- [Hadij-ElHouati2021a] A. Hadij-ElHouati, P. Cheben, A. Ortega-Moñux, J. G. Wangüemert-Pérez, R. Halir, J. de Oliva Rubio, J. H. Schmid, and I. Molina-Fernández. “High-Efficiency Conversion from Waveguide Mode to on-Chip Beam Using a Metamaterial Engineered Bragg Deflector”. In: *Opt. Lett.* 46.10 (May 15, 2021), pp. 2409–2412. ISSN: 0146-9592, 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.420993](https://doi.org/10.1364/OL.420993).
- [Hadij-ElHouati2021b] A. Hadij-ElHouati, A. Ortega-Moñux, J. G. Wangüemert-Pérez, R. Halir, S. Wang, J. H. Schmid, P. Cheben, and I. Molina-Fernández. “Low-Loss off-Axis Curved Waveguide Grating Demultiplexer”. In: *Opt. Lett.* 46.19 (Oct. 1, 2021), p. 4821. ISSN: 0146-9592, 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.434294](https://doi.org/10.1364/OL.434294).
- [Hadij-ElHouati2021c] A. Hadij-ElHouati, A. Ortega-Moñux, J. G. Wangüemert-Pérez, R. Halir, S. Wang, J. H. Schmid, P. Cheben, and Í. Molina-Fernández. “Low-Loss Curved Waveguide Grating Wavelength Demultiplexer”. In: *EOS Annual Meeting (EOSAM) 2021*. EOS Annual Meeting (EOSAM) 2021. Rome, Italy, 2021. URL: <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/22897> (visited on 12/22/2021).
- [Hadij-ElHouati2022] A. Hadij-ElHouati, A. Ortega-Moñux, J. G. Wangüemert-Pérez, R. Halir, J. H. Schmid, P. Cheben, and I. Molina-Fernández. “Curved Waveguide Grating Demultiplexer (CWG) with Flattened Response via Bimodal Output Waveguides”. In: *23rd European Conference on Integrated Optics (ECIO 2022)*. 23rd European Conference on Integrated Optics (ECIO 2022). May 4, 2022.
- [Halir2010] R. Halir, P. Cheben, J. H. Schmid, R. Ma, D. Bedard, S. Janz, D.-X. Xu, A. Densmore, J. Lapointe, and Í. Molina-Fernández. “Continuously Apodized Fiber-to-Chip Surface Grating Coupler with Refractive Index Engineered Subwavelength Structure”. In: *Opt. Lett.* 35.19 (Oct. 1, 2010), p. 3243. ISSN: 0146-9592, 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.35.003243](https://doi.org/10.1364/OL.35.003243).
- [Halir2016] R. Halir, P. Cheben, J. M. Luque-González, J. D. Sarmiento-Merenguel, J. H. Schmid, G. Wangüemert-Pérez, D.-X. Xu, S. Wang, A. Ortega-Moñux, and Í. Molina-Fernández. “Ultra-broadband Nanophotonic Beamsplitter Using an Anisotropic Sub-wavelength Metamaterial”. In: *Laser & Photonics Reviews* 10.6 (Nov. 2016), pp. 1039–1046. ISSN: 1863-8880, 1863-8899. DOI: [10.1002/lpor.201600213](https://doi.org/10.1002/lpor.201600213).



- [Halir2018] R. Halir, A. Ortega-Monux, D. Benedikovic, G. Z. Mashanovich, J. G. Wanguemert-Perez, J. H. Schmid, I. Molina-Fernandez, and P. Cheben. “Subwavelength-Grating Metamaterial Structures for Silicon Photonic Devices”. In: *Proc. IEEE* 106.12 (Dec. 2018), pp. 2144–2157. ISSN: 0018-9219, 1558-2256. DOI: [10.1109/JPROC.2018.2851614](https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2851614).
- [Han2019] L. Han, B. P.-P. Kuo, A. Pejkcic, N. Alic, and S. Radic. “50GHz Silicon Cascaded Mach-Zehnder Wavelength Filter and Automatic Phase Error Correction”. In: *2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Mar. 2019, pp. 1–3.
- [Hao2006] Y. Hao, Y. Wu, J. Yang, X. Jiang, and M. Wang. “Novel Dispersive and Focusing Device Configuration Based on Curved Waveguide Grating (CWG)”. In: *Opt. Express* 14.19 (2006), p. 8630. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.14.008630](https://doi.org/10.1364/OE.14.008630).
- [Hardy2016a] S. Hardy. *Ciena Buys TeraXion’s Indium Phosphide, Silicon Photonics Assets*. Lightwave. Jan. 19, 2016. URL: <https://www.lightwaveonline.com/business/mergers-acquisitions/article/16654273/ciena-buys-teraxions-indium-phosphide-silicon-photonics-assets> (visited on 07/15/2021).
- [Hardy2016b] S. Hardy. *Juniper Networks to Buy Silicon Photonics Company Aurrion*. Lightwave. Aug. 3, 2016. URL: <https://www.lightwaveonline.com/business/mergers-acquisitions/article/16654159/juniper-networks-to-buy-silicon-photonics-company-aurrion> (visited on 07/15/2021).
- [Herrero-Bermello2020] A. Herrero-Bermello, A. Herrero-Bermello, A. Dias-Ponte, J. M. Luque-González, A. Ortega-Moñux, A. V. Velasco, P. Cheben, and R. Halir. “Experimental Demonstration of Metamaterial Anisotropy Engineering for Broadband On-Chip Polarization Beam Splitting”. In: *Opt. Express, OE* 28.11 (May 25, 2020), pp. 16385–16393. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.389070](https://doi.org/10.1364/OE.389070).
- [Horst2013] F. Horst, W. M. Green, S. Assefa, S. M. Shank, Y. A. Vlasov, and B. J. Offrein. “Cascaded Mach-Zehnder Wavelength Filters in Silicon Photonics for Low Loss and Flat Pass-Band WDM (de-)Multiplexing”. In: *Opt. Express* 21.10 (May 20, 2013), p. 11652. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.21.011652](https://doi.org/10.1364/OE.21.011652).
- [IHP] IHP. *IHP:SiGe BiCMOS and Silicon Photonics Technologies*. URL: <https://www.ihp-microelectronics.com/services/research-and-prototyping-service/mpw-prototyping-service/sigec-bicmos-technologies> (visited on 03/29/2022).
- [Ikegami2021] S. Ikegami, R. C. Benirschke, H. Fakhrai-Rad, M. H. Motamedi, R. Hockett, S. David, H. K. Lee, J. Kang, and T. J. Gniadek. “Target Specific Serologic Analysis of COVID-19 Convalescent Plasma”. In: *PLoS ONE* 16.4 (Apr. 28, 2021), e0249938. ISSN: 1932-6203. DOI: [10.1371/journal.pone.0249938](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249938).
- [IMB-CNM2022] IMB-CNM. *Silicon Nitride Photonic Integration Platform | IMB CNM*. 2022. URL: <https://www.imb-cnm.csic.es/en/micro-and-nanofabrication-clean-room/silicon-nitride-photonic-integration-platform> (visited on 03/29/2022).
- [imec2022a] imec. *Imec’s Silicon Photonics Platform Services*. Mar. 24, 2022. URL: <https://www.imec-int.com/sites/default/files/imported/SILICON-PHOTONICS-V06.pdf> (visited on 03/24/2022).
- [imec2022b] imec. *Integrated Photonics | Imec*. 2022. URL: <https://www.imec-int.com/en/integrated-photonics> (visited on 03/29/2022).

## Appendix B. Resumen en español

---

- [INPHOTEC] INPHOTEC. *Silicon Photonics*. URL: [https://www.inphotec.it/technology\\_post\\_type/silicon-photonics-2/](https://www.inphotec.it/technology_post_type/silicon-photonics-2/) (visited on 03/29/2022).
- [Intel Corporation2021] Intel Corporation. *Intel® Silicon Photonics Optical Transceiver Products*. Intel. 2021. URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/network-io/high-performance-fabrics/silicon-photonics.html> (visited on 06/28/2021).
- [IPSR-I2020] IPSR-I. *2020 Integrated Photonic Systems Roadmap - International (IPSR-I) : Silicon Photonics*. Integrated Photonics Systems Roadmap – International, 2020. URL: <https://photonicsmanufacturing.org> (visited on 03/29/2022).
- [Janz2004] S. Janz, A. Balakrishnan, S. Charbonneau, P. Cheben, M. Cloutier, A. Delage, K. Dossou, L. Erickson, M. Gao, P. Krug, B. Lamontagne, M. Packirisamy, M. Pearson, and D.-X. Xu. “Planar Waveguide Echelle Gratings in Silica-on-Silicon”. In: *IEEE Photonics Technology Letters* 16.2 (Feb. 2004), pp. 503–505. ISSN: 1941-0174. DOI: [10.1109/LPT.2003.823139](https://doi.org/10.1109/LPT.2003.823139).
- [Khan2019] M. U. Khan, Y. Xing, Y. Ye, and W. Bogaerts. “Photonic Integrated Circuit Design in a Foundry+Fabless Ecosystem”. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 25.5 (Sept. 2019), pp. 1–14. ISSN: 1558-4542. DOI: [10.1109/JSTQE.2019.2918949](https://doi.org/10.1109/JSTQE.2019.2918949).
- [Kim2018] S. Kim, D. A. Westly, B. J. Roxworthy, Q. Li, A. Yulaev, K. Srinivasan, and V. A. Aksyuk. “Photonic Waveguide to Free-Space Gaussian Beam Extreme Mode Converter”. In: *Light Sci Appl* 7.1 (Dec. 2018), p. 72. ISSN: 2047-7538. DOI: [10.1038/s41377-018-0073-2](https://doi.org/10.1038/s41377-018-0073-2).
- [Kim2021] I. Kim, R. J. Martins, J. Jang, T. Badloe, S. Khadir, H.-Y. Jung, H. Kim, J. Kim, P. Genevet, and J. Rho. “Nanophotonics for Light Detection and Ranging Technology”. In: *Nat. Nanotechnol.* 16.5 (5 May 2021), pp. 508–524. ISSN: 1748-3395. DOI: [10.1038/s41565-021-00895-3](https://doi.org/10.1038/s41565-021-00895-3).
- [KVH Industries Inc2021] KVH Industries, Inc. *KVH Introduces P-series IMUs with PIC Technology and New Accelerometers*. Apr. 27, 2021. URL: <https://www.kvh.com/press-room/press-releases/2021/210427-kvh-introduces-p-series-imus-with-pic-technology-and-new-accelerometers> (visited on 06/04/2021).
- [Liang2021] D. Liang and J. E. Bowers. “Recent Progress in Heterogeneous III-V-on-Silicon Photonic Integration”. In: *gxjzz* 2.1 (Mar. 1, 2021), pp. 59–83. ISSN: 2689-9620. DOI: [10.37188/lam.2021.005](https://doi.org/10.37188/lam.2021.005).
- [LIGENTEC2022] LIGENTEC. *All Nitride Technology*. 2022. URL: <https://www.ligentec.com/ligentec-an-technology/> (visited on 03/29/2022).
- [Littlejohns2020] C. G. Littlejohns, D. J. Rowe, H. Du, K. Li, W. Zhang, W. Cao, T. Dominguez Bucio, X. Yan, M. Banakar, D. Tran, S. Liu, F. Meng, B. Chen, Y. Qi, X. Chen, M. Nedeljkovic, L. Mastronardi, R. Maharjan, S. Bohora, A. Dhakal, I. Crowe, A. Khurana, K. C. Balram, L. Zagaglia, F. Floris, P. O’Brien, E. Di Gaetano, H. M. Chong, F. Y. Gardes, D. J. Thomson, G. Z. Mashanovich, M. Sorel, and G. T. Reed. “CORNERSTONE’s Silicon Photonics Rapid Prototyping Platforms: Current Status and Future Outlook”. In: *Applied Sciences* 10.22 (Nov. 19, 2020), p. 8201. ISSN: 2076-3417. DOI: [10.3390/app10228201](https://doi.org/10.3390/app10228201).
- [Liu2021] S. Liu and A. Khope. “Latest Advances in High-Performance Light Sources and Optical Amplifiers on Silicon”. In: *J. Semicond.* 42.4 (Apr. 1, 2021), p. 041307. ISSN: 1674-4926, 2058-6140. DOI: [10.1088/1674-4926/42/4/041307](https://doi.org/10.1088/1674-4926/42/4/041307).

- [Luque-González2019] J. M. Luque-González, R. Halir, J. G. Wangüemert-Pérez, J. de-Oliva-Rubio, J. H. Schmid, P. Cheben, Í. Molina-Fernández, and A. Ortega-Moñux. “An Ultracompact GRIN-Lens-Based Spot Size Converter Using Subwavelength Grating Metamaterials”. In: *Laser & Photonics Reviews* 13.11 (2019), p. 1900172. ISSN: 1863-8899. DOI: [10.1002/lpor.201900172](https://doi.org/10.1002/lpor.201900172).
- [Luque-González2020] J. M. Luque-González, A. Herrero-Bermello, A. Herrero-Bermello, A. Ortega-Moñux, M. Sánchez-Rodríguez, A. V. Velasco, J. H. Schmid, P. Cheben, Í. Molina-Fernández, Í. Molina-Fernández, R. Halir, and R. Halir. “Polarization Splitting Directional Coupler Using Tilted Subwavelength Gratings”. In: *Opt. Lett., OL* 45.13 (July 1, 2020), pp. 3398–3401. ISSN: 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.394696](https://doi.org/10.1364/OL.394696).
- [Luque-González2021a] J. M. Luque-González, A. Ortega-Moñux, R. Halir, J. H. Schmid, P. Cheben, Í. Molina-Fernández, and J. G. Wangüemert-Pérez. “Bricked Subwavelength Gratings: A Tailorable On-Chip Metamaterial Topology”. In: *Laser & Photonics Reviews* 15.6 (2021), p. 2000478. ISSN: 1863-8899. DOI: [10.1002/lpor.202000478](https://doi.org/10.1002/lpor.202000478).
- [Luque-González2021b] J. M. Luque-González, A. Sánchez-Postigo, A. Hadij-ElHouati, A. Ortega-Moñux, J. G. Wangüemert-Pérez, J. H. Schmid, P. Cheben, Í. Molina-Fernández, and R. Halir. “A Review of Silicon Subwavelength Gratings: Building Break-through Devices with Anisotropic Metamaterials”. In: *Nanophotonics* 10.11 (Aug. 26, 2021), pp. 2765–2797. ISSN: 2192-8614. DOI: [10.1515/nanoph-2021-0110](https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0110).
- [MACOM2021] MACOM. *MACOM Silicon Photonics (SiPh)*. 2021. URL: <https://www.macom.com/technologies/siph> (visited on 06/28/2021).
- [Madsen1998] C. Madsen, J. Wagener, T. Strasser, D. Muehlner, M. Milbrodt, E. Laskowski, and J. DeMarco. “Planar Waveguide Optical Spectrum Analyzer Using a UV-induced Grating”. In: *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* 4.6 (1998), pp. 925–929. ISSN: 1077260X. DOI: [10.1109/2944.736078](https://doi.org/10.1109/2944.736078).
- [Mandelsham2001] V. Mandelsham. “FDM: The Filter Diagonalization Method for Data Processing in NMR Experiments”. In: *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy* 38.2 (Mar. 2001), pp. 159–196. ISSN: 00796565. DOI: [10.1016/S0079-6565\(00\)00032-7](https://doi.org/10.1016/S0079-6565(00)00032-7).
- [Masood2013] A. Masood, M. Pantouvaki, G. Lepage, P. Verheyen, J. Van Campenhout, P. Absil, D. Van Thourhout, and W. Bogaerts. “Comparison of Heater Architectures for Thermal Control of Silicon Photonic Circuits”. In: *10th International Conference on Group IV Photonics*. 10th International Conference on Group IV Photonics. Aug. 2013, pp. 83–84. DOI: [10.1109/Group4.2013.6644437](https://doi.org/10.1109/Group4.2013.6644437).
- [Mathworks Inc2017] Mathworks Inc. *MATLAB Version 9.3.0.713579 (R2017b)*. Natick, Massachusetts: The Mathworks, Inc., 2017.
- [Mekis2011] A. Mekis, S. Gloeckner, G. Masini, A. Narasimha, T. Pinguet, S. Sahni, and P. De Dobbelaere. “A Grating-Coupler-Enabled CMOS Photonics Platform”. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 17.3 (May 2011), pp. 597–608. ISSN: 1558-4542. DOI: [10.1109/JSTQE.2010.2086049](https://doi.org/10.1109/JSTQE.2010.2086049).
- [Melati2019] D. Melati, P. G. Verly, A. Delâge, S. Wang, J. Lapointe, P. Cheben, J. H. Schmid, S. Janz, and D.-X. Xu. “Compact and Low Crosstalk Echelle Grating Demultiplexer on Silicon-On-Insulator Technology”. In: *Electronics* 8.6 (June 18, 2019), p. 687. ISSN: 2079-9292. DOI: [10.3390/electronics8060687](https://doi.org/10.3390/electronics8060687).

## Appendix B. Resumen en español

---

- [Miller2018] R. Miller. *Cisco to Acquire Silicon Photonics Chip Maker Luxtera for \$660 Million*. TechCrunch. Dec. 18, 2018. URL: <https://social.techcrunch.com/2018/12/18/cisco-to-acquire-silicon-photonics-chip-maker-luxtera-for-660-million/> (visited on 07/15/2021).
- [Naghdi2018] B. Naghdi and L. R. Chen. “Silicon Photonic Four-Channel Optical Add-Drop Multiplexer Enabled by Subwavelength Grating Waveguides”. In: *IEEE Photonics J.* 10.4 (Aug. 2018), pp. 1–10. ISSN: 1943-0655, 1943-0647. DOI: [10.1109/JPHOT.2018.2857769](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2018.2857769).
- [Newsroom2019] N. Newsroom. *NVIDIA to Acquire Mellanox for \$6.9 Billion*. NVIDIA Newsroom Newsroom. Mar. 11, 2019. URL: <http://nvidianews.nvidia.com/news/nvidia-to-acquire-mellanox-for-6-9-billion> (visited on 07/15/2021).
- [Okamoto2014] K. Okamoto. “Wavelength-Division-Multiplexing Devices in Thin SOI: Advances and Prospects”. In: *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* 20.4 (July 2014), pp. 248–257. ISSN: 1077-260X, 1558-4542. DOI: [10.1109/JSTQE.2013.2291623](https://doi.org/10.1109/JSTQE.2013.2291623).
- [Orfanidis2002] S. J. Orfanidis. “Diffraction – Plane-Wave Spectrum”. In: *Electromagnetic Waves and Antennas*. Rutgers University New Brunswick, NJ, 2002.
- [Pathak2013] S. Pathak, M. Vanslebrouck, P. Dumon, D. Van Thourhout, and W. Bogaerts. “Optimized Silicon AWG With Flattened Spectral Response Using an MMI Aperture”. In: *J. Lightwave Technol.* 31.1 (Jan. 2013), pp. 87–93. ISSN: 0733-8724, 1558-2213. DOI: [10.1109/JLT.2012.2231399](https://doi.org/10.1109/JLT.2012.2231399).
- [Pathak2014] S. Pathak, P. Dumon, D. Van Thourhout, and W. Bogaerts. “Comparison of AWGs and Echelle Gratings for Wavelength Division Multiplexing on Silicon-on-Insulator”. In: *IEEE Photonics J.* 6.5 (Oct. 2014), pp. 1–9. ISSN: 1943-0655. DOI: [10.1109/JPHOT.2014.2361658](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2014.2361658).
- [Pereira-Martín2021] D. Pereira-Martín, J. M. Luque-González, J. Gonzalo Wangüemert-Pérez, A. Hadij-ElHouati, Í. Molina-Fernández, P. Cheben, J. H. Schmid, S. Wang, W. N. Ye, J. Čtyroký, and A. Ortega-Moñux. “Complex Spectral Filters in Silicon Waveguides Based on Cladding-Modulated Bragg Gratings”. In: *Opt. Express* 29.11 (May 24, 2021), p. 15867. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.420696](https://doi.org/10.1364/OE.420696).
- [Pérez-Armenta2020] C. Pérez-Armenta, A. Ortega-Moñux, J. Čtyroký, P. Cheben, J. H. Schmid, R. Halir, Í. Molina-Fernández, and J. G. Wangüemert-Pérez. “Narrowband Bragg Filters Based on Subwavelength Grating Waveguides for Silicon Photonic Sensing”. In: *Opt. Express* 28.25 (Dec. 7, 2020), p. 37971. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.404364](https://doi.org/10.1364/OE.404364).
- [Potton2004] R. J. Potton. “Reciprocity in Optics”. In: *Rep. Prog. Phys.* 67.5 (May 1, 2004), pp. 717–754. ISSN: 0034-4885, 1361-6633. DOI: [10.1088/0034-4885/67/5/R03](https://doi.org/10.1088/0034-4885/67/5/R03).
- [Poulton2017] C. V. Poulton, M. J. Byrd, M. Raval, Z. Su, N. Li, E. Timurdogan, D. Coolbaugh, D. Vermeulen, and M. R. Watts. “Large-Scale Silicon Nitride Nanophotonic Phased Arrays at Infrared and Visible Wavelengths”. In: *Opt. Lett.* 42.1 (Jan. 1, 2017), p. 21. ISSN: 0146-9592, 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.42.000021](https://doi.org/10.1364/OL.42.000021).
- [Rahim2018] A. Rahim, T. Spuesens, R. Baets, and W. Bogaerts. “Open-Access Silicon Photonics: Current Status and Emerging Initiatives”. In: *Proc. IEEE* 106.12 (Dec. 2018), pp. 2313–2330. ISSN: 0018-9219, 1558-2256. DOI: [10.1109/JPROC.2018.2878686](https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2878686).

- [Rakowski2020] M. Rakowski, C. Meagher, K. Nummy, A. Aboketaf, J. Ayala, Y. Bian, B. Harris, K. Mclean, K. McStay, A. Sahin, L. Medina, B. Peng, Z. Sowinski, A. Stricker, T. Houghton, C. Hedges, K. Giewont, A. Jacob, T. Letavic, D. Riggs, A. Yu, and J. Pellerin. “45nm CMOS — Silicon Photonics Monolithic Technology (45CLO) for Next-Generation, Low Power and High Speed Optical Interconnects”. In: *2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Mar. 2020, pp. 1–3.
- [Reed2010] G. T. Reed, G. Mashanovich, F. Y. Gardes, and D. J. Thomson. “Silicon Optical Modulators”. In: *Nature Photon* 4.8 (Aug. 2010), pp. 518–526. ISSN: 1749-4885, 1749-4893. DOI: [10.1038/nphoton.2010.179](https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.179).
- [Rickman2014] A. Rickman. “The Commercialization of Silicon Photonics”. In: *Nature Photon* 8.8 (Aug. 2014), pp. 579–582. ISSN: 1749-4885, 1749-4893. DOI: [10.1038/nphoton.2014.175](https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.175).
- [Ropp2021] C. Ropp, A. Yulaev, D. Westly, G. Simelgor, and V. Aksyuk. “Meta-Grating Outcouplers for Optimized Beam Shaping in the Visible”. In: *Opt. Express* 29.10 (May 10, 2021), p. 14789. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.424644](https://doi.org/10.1364/OE.424644).
- [Sacher2018] W. D. Sacher, J. C. Mikkelsen, Y. Huang, J. C. C. Mak, Z. Yong, X. Luo, Y. Li, P. Dumais, J. Jiang, D. Goodwill, E. Bernier, P. G.-Q. Lo, and J. K. S. Poon. “Monolithically Integrated Multilayer Silicon Nitride-on-Silicon Waveguide Platforms for 3-D Photonic Circuits and Devices”. In: *Proceedings of the IEEE* 106.12 (Dec. 2018), pp. 2232–2245. ISSN: 1558-2256. DOI: [10.1109/JPROC.2018.2860994](https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2860994).
- [Sánchez-Postigo2021a] A. Sánchez-Postigo, R. Halir, J. G. Wangüemert-Pérez, A. Ortega-Moñux, S. Wang, M. Vachon, J. H. Schmid, D.-X. Xu, P. Cheben, and Í. Molina-Fernández. “Breaking the Coupling Efficiency–Bandwidth Trade-Off in Surface Grating Couplers Using Zero-Order Radiation”. In: *Laser & Photonics Reviews* 15.6 (2021), p. 2000542. ISSN: 1863-8899. DOI: [10.1002/lpor.202000542](https://doi.org/10.1002/lpor.202000542).
- [Sánchez-Postigo2021b] A. Sánchez-Postigo, A. Ortega-Moñux, J. Soler Penadés, A. Osman, M. Nedeljkovic, Z. Qu, Y. Wu, Í. Molina-Fernández, P. Cheben, G. Z. Mashanovich, and J. G. Wangüemert-Pérez. “Suspended Germanium Waveguides with Subwavelength-Grating Metamaterial Cladding for the Mid-Infrared Band”. In: *Opt. Express* 29.11 (May 24, 2021), p. 16867. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.422764](https://doi.org/10.1364/OE.422764).
- [Schmid2007] J. H. Schmid, P. Cheben, S. Janz, J. Lapointe, E. Post, and D.-X. Xu. “Gradient-Index Antireflective Subwavelength Structures for Planar Waveguide Facets”. In: *Opt. Lett.* 32.13 (July 1, 2007), p. 1794. ISSN: 0146-9592, 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.32.001794](https://doi.org/10.1364/OL.32.001794).
- [Schmid2008] J. H. Schmid, P. Cheben, S. Janz, J. Lapointe, E. Post, A. Delâge, A. Densmore, B. Lamontagne, P. Waldron, and D.-X. Xu. “Subwavelength Grating Structures in Silicon-on-Insulator Waveguides”. In: *Advances in Optical Technologies* 2008 (July 13, 2008), pp. 1–8. ISSN: 1687-6393, 1687-6407. DOI: [10.1155/2008/685489](https://doi.org/10.1155/2008/685489).
- [Schmid2011] J. H. Schmid, P. Cheben, P. J. Bock, R. Halir, J. Lapointe, S. Janz, A. Delage, A. Densmore, J.-M. Fedeli, T. J. Hall, B. Lamontagne, R. Ma, I. Molina-Fernandez, and D.-X. Xu. “Refractive Index Engineering With Subwavelength Gratings in Silicon Microphotonic Waveguides”. In: *IEEE Photonics J.* 3.3 (June 2011), pp. 597–607. ISSN: 1943-0655. DOI: [10.1109/JPHOT.2011.2139198](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2011.2139198).

- [Shi2013] W. Shi, H. Yun, C. Lin, M. Greenberg, X. Wang, Y. Wang, S. T. Fard, J. Flueckiger, N. A. F. Jaeger, and L. Chrostowski. “Ultra-Compact, Flat-Top Demultiplexer Using Anti-Reflection Contra-Directional Couplers for CWDM Networks on Silicon”. In: *Opt. Express* 21.6 (Mar. 25, 2013), p. 6733. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.21.006733](https://doi.org/10.1364/OE.21.006733).
- [Shi2020a] W. Shi. *Nokia Acquires Elenion to Boost Optical Offering*. Telecoms.com. Feb. 19, 2020. URL: <https://telecoms.com/502542/nokia-acquires-elenion-to-boost-optical-offering/> (visited on 07/15/2021).
- [Shi2020b] W. Shi, Y. Tian, and A. Gervais. “Scaling Capacity of Fiber-Optic Transmission Systems via Silicon Photonics”. In: *Nanophotonics* 9.16 (Nov. 4, 2020), pp. 4629–4663. ISSN: 2192-8614, 2192-8606. DOI: [10.1515/nanoph-2020-0309](https://doi.org/10.1515/nanoph-2020-0309).
- [Siew2021] S. Y. Siew, B. Li, F. Gao, H. Y. Zheng, W. Zhang, P. Guo, S. W. Xie, A. Song, B. Dong, L. W. Luo, C. Li, X. Luo, and P. G.-Q. Lo. “Review of Silicon Photonics Technology and Platform Development”. In: *Journal of Lightwave Technology* (2021), pp. 1–1. ISSN: 1558-2213. DOI: [10.1109/JLT.2021.3066203](https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3066203).
- [Smit1996] M. Smit and C. Van Dam. “PHASAR-based WDM-devices: Principles, Design and Applications”. In: *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* 2.2 (June 1996), pp. 236–250. ISSN: 1077260X. DOI: [10.1109/2944.577370](https://doi.org/10.1109/2944.577370).
- [Soref1986] R. Soref and J. Larenzo. “All-Silicon Active and Passive Guided-Wave Components for  $\lambda = 1.3$  and  $1.6$  Mm”. In: *IEEE J. Quantum Electron.* 22.6 (June 1986), pp. 873–879. ISSN: 0018-9197. DOI: [10.1109/JQE.1986.1073057](https://doi.org/10.1109/JQE.1986.1073057).
- [Stanton2017] E. J. Stanton, N. Volet, and J. E. Bowers. “Low-Loss Demonstration and Refined Characterization of Silicon Arrayed Waveguide Gratings in the near-Infrared”. In: *Opt. Express* 25.24 (Nov. 27, 2017), p. 30651. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.25.030651](https://doi.org/10.1364/OE.25.030651).
- [Stoll1978] H. M. Stoll. “Distributed Bragg Deflector: A Multifunctional Integrated Optical Device”. In: *Appl. Opt., AO* 17.16 (Aug. 15, 1978), pp. 2562–2569. ISSN: 2155-3165. DOI: [10.1364/AO.17.002562](https://doi.org/10.1364/AO.17.002562).
- [Sun2013] J. Sun, E. Timurdogan, A. Yaacobi, E. S. Hosseini, and M. R. Watts. “Large-Scale Nanophotonic Phased Array”. In: *Nature* 493.7431 (Jan. 2013), pp. 195–199. ISSN: 0028-0836, 1476-4687. DOI: [10.1038/nature11727](https://doi.org/10.1038/nature11727).
- [Sun2019] J. Sun, R. Kumar, M. Sakib, J. Driscoll, H. Jayatilleka, and H. Rong. “A 128 Gb/s PAM4 Silicon Microring Modulator With Integrated Thermo-Optic Resonance Tuning”. In: *Journal of Lightwave Technology* 37.1 (2019), pp. 110–115. ISSN: 0733-8724. DOI: [10.1109/JLT.2018.2878327](https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2878327).
- [Synopsys Inc2020] Synopsys Inc. *FullWAVE User Guide*. 2020. URL: <https://www.synopsys.com/photonic-solutions/rsoft-photonic-device-tools/passive-device-fullwave.html>.
- [Szelag2019] B. Szelag, K. Hassan, L. Adelmini, E. Ghegin, P. Rodriguez, F. Nemouchi, P. Brianceau, E. Vermande, A. Schembri, D. Carrara, P. Cavalié, F. Franchin, M.-C. Roure, L. Sanchez, C. Jany, and S. Olivier. “Hybrid III–V/Silicon Technology for Laser Integration on a 200-Mm Fully CMOS-Compatible Silicon Photonics Platform”. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 25.5 (Sept. 2019), pp. 1–10. ISSN: 1558-4542. DOI: [10.1109/JSTQE.2019.2904445](https://doi.org/10.1109/JSTQE.2019.2904445).
- [Taflove2005] A. Taflove and S. C. Hagness. *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*. 3rd ed. Artech House Antennas and Propagation Library. Boston: Artech House, 2005. 1006 pp. ISBN: 978-1-58053-832-9.

- [Taillaert2002] D. Taillaert, W. Bogaerts, P. Bienstman, T. Krauss, P. Van Daele, I. Moerman, S. Verstuyft, K. De Mesel, and R. Baets. “An Out-of-Plane Grating Coupler for Efficient Butt-Coupling between Compact Planar Waveguides and Single-Mode Fibers”. In: *IEEE Journal of Quantum Electronics* 38.7 (July 2002), pp. 949–955. ISSN: 1558-1713. DOI: [10.1109/JQE.2002.1017613](https://doi.org/10.1109/JQE.2002.1017613).
- [Taillaert2004] D. Taillaert, P. Bienstman, and R. Baets. “Compact Efficient Broadband Grating Coupler for Silicon-on-Insulator Waveguides”. In: *Opt. Lett.* 29.23 (Dec. 1, 2004), p. 2749. ISSN: 0146-9592, 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.29.002749](https://doi.org/10.1364/OL.29.002749).
- [Taillaert2006] D. Taillaert, F. Van Laere, M. Ayre, W. Bogaerts, D. Van Thourhout, P. Bienstman, and R. Baets. “Grating Couplers for Coupling between Optical Fibers and Nanophotonic Waveguides”. In: *Jpn. J. Appl. Phys.* 45 (8A Aug. 4, 2006), pp. 6071–6077. ISSN: 0021-4922, 1347-4065. DOI: [10.1143/JJAP.45.6071](https://doi.org/10.1143/JJAP.45.6071).
- [Tamir1977] T. Tamir and S. T. Peng. “Analysis and Design of Grating Couplers”. In: *Appl. Phys.* 14.3 (Nov. 1, 1977), pp. 235–254. ISSN: 1432-0630. DOI: [10.1007/BF00882729](https://doi.org/10.1007/BF00882729).
- [Thomson2016] D. Thomson, A. Zilkie, J. E. Bowers, T. Komljenovic, G. T. Reed, L. Vivien, D. Marris-Morini, E. Cassan, L. Viot, J.-M. Fédéli, J.-M. Hartmann, J. H. Schmid, D.-X. Xu, F. Boeuf, P. O’Brien, G. Z. Mashanovich, and M. Nedeljkovic. “Roadmap on Silicon Photonics”. In: *J. Opt.* 18.7 (July 1, 2016), p. 073003. ISSN: 2040-8978, 2040-8986. DOI: [10.1088/2040-8978/18/7/073003](https://doi.org/10.1088/2040-8978/18/7/073003).
- [Tondini2017] S. Tondini, C. Castellan, M. Mancinelli, C. Kopp, and L. Pavesi. “Methods for Low Crosstalk and Wavelength Tunability in Arrayed-Waveguide Grating for On-Silicon Optical Network”. In: *J. Lightwave Technol.* 35.23 (Dec. 1, 2017), pp. 5134–5141. ISSN: 0733-8724, 1558-2213. DOI: [10.1109/JLT.2017.2768161](https://doi.org/10.1109/JLT.2017.2768161).
- [Tower Semiconductor2018] Tower Semiconductor. *Silicon Photonics (SiPho) - Tower Semiconductor*. July 1, 2018. URL: <https://towersemi.com/technology/rf-and-hpa/silicon-photonics-rf/> (visited on 03/29/2022).
- [Van Acoleyen2009] K. Van Acoleyen, W. Bogaerts, J. Jágorská, N. Le Thomas, R. Houdré, and R. Baets. “Off-Chip Beam Steering with a One-Dimensional Optical Phased Array on Silicon-on-Insulator”. In: *Opt. Lett.* 34.9 (May 1, 2009), p. 1477. ISSN: 0146-9592, 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.34.001477](https://doi.org/10.1364/OL.34.001477).
- [Van Acoleyen2011] K. Van Acoleyen, W. Bogaerts, and R. Baets. “Two-Dimensional Dispersive Off-Chip Beam Scanner Fabricated on Silicon-On-Insulator”. In: *IEEE Photon. Technol. Lett.* 23.17 (Sept. 2011), pp. 1270–1272. ISSN: 1041-1135, 1941-0174. DOI: [10.1109/LPT.2011.2159785](https://doi.org/10.1109/LPT.2011.2159785).
- [Velasco2012] A. V. Velasco, P. J. Bock, P. Cheben, M. L. Calvo, J. H. Schmid, J. Lapaointe, D.-X. Xu, S. Janz, and A. Delâge. “Bandpass Filter Implemented with Blazed Waveguide Sidewall Gratings in Silicon-on-Insulator”. In: *Electronics Letters* 48.12 (June 7, 2012), pp. 715–717. ISSN: 1350-911X. DOI: [10.1049/el.2012.0591](https://doi.org/10.1049/el.2012.0591).
- [Vermeulen2018] D. Vermeulen and C. V. Poulton. “Optical Interfaces for Silicon Photonic Circuits”. In: *Proc. IEEE* 106.12 (Dec. 2018), pp. 2270–2280. ISSN: 0018-9219, 1558-2256. DOI: [10.1109/JPROC.2018.2865725](https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2865725).
- [Vivien2009] L. Vivien, J. Osmond, J.-M. Fédéli, D. Marris-Morini, P. Crozat, J.-F. Damlencourt, E. Cassan, Y. Lecunff, and S. Laval. “42 GHz p.i.n Germanium Photodetector Integrated in a Silicon-on-Insulator Waveguide”. In: *Optics Express* 17.8 (2009), pp. 6252–6257. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.17.006252](https://doi.org/10.1364/OE.17.006252).

## Appendix B. Resumen en español

---

- [Vivien2012] L. Vivien, A. Polzer, D. Marris-Morini, J. Osmond, J. Hartmann, P. Crozat, E. Cassan, C. Kopp, H. Zimmermann, and J. Fédéli. “Zero-Bias 40Gbit/s Germanium Waveguide Photodetector on Silicon”. In: *Optics Express* 20.2 (2012), pp. 1096–1101. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.20.001096](https://doi.org/10.1364/OE.20.001096).
- [Wangüemert-Pérez2019] J. G. Wangüemert-Pérez, A. Hadij-ElHouati, A. Sánchez-Postigo, J. Leuermann, D.-X. Xu, P. Cheben, A. Ortega-Moñux, R. Halir, and Í. Molina-Fernández. “[INVITED] Subwavelength Structures for Silicon Photonics Biosensing”. In: *Optics & Laser Technology* 109 (Jan. 1, 2019), pp. 437–448. ISSN: 0030-3992. DOI: [10.1016/j.optlastec.2018.07.071](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.07.071).
- [Watanabe2017] T. Watanabe, M. Ayata, U. Koch, Y. Fedoryshyn, and J. Leuthold. “Perpendicular Grating Coupler Based on a Blazed Antireflection Structure”. In: *Journal of Lightwave Technology* 35.21 (Nov. 2017), pp. 4663–4669. ISSN: 07338724. DOI: [10.1109/JLT.2017.2755673](https://doi.org/10.1109/JLT.2017.2755673).
- [Witzens2018] J. Witzens. “High-Speed Silicon Photonics Modulators”. In: *Proceedings of the IEEE* 106.12 (Dec. 2018), pp. 2158–2182. ISSN: 1558-2256. DOI: [10.1109/JPROC.2018.2877636](https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2877636).
- [Wörhoff2015] K. Wörhoff, R. G. Heideman, A. Leinse, and M. Hoekman. “TriPleX: A Versatile Dielectric Photonic Platform”. In: *Advanced Optical Technologies* 4.2 (Apr. 1, 2015), pp. 189–207. ISSN: 2192-8584. DOI: [10.1515/aot-2015-0016](https://doi.org/10.1515/aot-2015-0016).
- [Yang2019] W. Yang, J. Chen, Y. Zhang, Y. Zhang, J.-H. He, and X. Fang. “Silicon-Compatible Photodetectors: Trends to Monolithically Integrate Photosensors with Chip Technology”. In: *Advanced Functional Materials* 29.18 (2019), p. 1808182. ISSN: 1616-3028. DOI: [10.1002/adfm.201808182](https://doi.org/10.1002/adfm.201808182).
- [Yole Développement2021] Yole Développement. *Silicon Photonics: Market and Technology Report 2021*. Yole Développement, 2021. URL: [https://www.i-micronews.com/products/silicon-photonics-2021/?utm\\_source=PR&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=PR\\_Silicon\\_Photonics\\_YOLEGROUP\\_May2021](https://www.i-micronews.com/products/silicon-photonics-2021/?utm_source=PR&utm_medium=email&utm_campaign=PR_Silicon_Photonics_YOLEGROUP_May2021) (visited on 06/04/2021).
- [Yun2019] H. Yun, M. Hammood, S. Lin, L. Chrostowski, and N. A. F. Jaeger. “Broadband Flat-Top SOI Add-Drop Filters Using Apodized Sub-Wavelength Grating Contradirectional Couplers”. In: *Opt. Lett.* 44.20 (Oct. 15, 2019), p. 4929. ISSN: 0146-9592, 1539-4794. DOI: [10.1364/OL.44.004929](https://doi.org/10.1364/OL.44.004929).
- [Zou2017] J. Zou, Z. Le, J. Hu, and J.-J. He. “Performance Improvement for Silicon-Based Arrayed Waveguide Grating Router”. In: *Opt. Express* 25.9 (May 1, 2017), p. 9963. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.25.009963](https://doi.org/10.1364/OE.25.009963).