

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño

Maestría y Doctorado en Ciencia e Ingeniería



Diseño de rejillas de acoplamiento fibra a guía de onda

Tesis

para la obtención del grado de

Doctor en Ciencias

que presenta:

Paola Góngora Lugo

Director de tesis.

Dr. Enrique Efren García Guerrero

Co-Director de tesis.

Dr. Heriberto Márquez Becerra

Ensenada, Baja California, México, Noviembre 2022.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño

Maestría y Doctorado en Ciencia e Ingeniería

Diseño de rejillas de acoplamiento fibra a guía de onda

Tesis

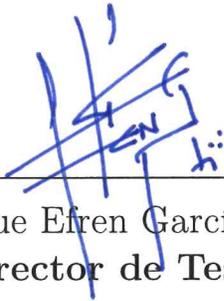
para la obtención del grado de

Doctor en Ciencias

que presenta:

PAOLA GÓNGORA LUGO

y aprobada por el comité:



Dr. Enrique Efrén García Guerrero
Director de Tesis

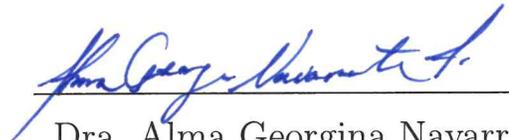


Dr. Heriberto Márquez Becerra
Co-Director de Tesis



Dra. Elena Tchaikina Kolesnikova

Miembro del Comité



Dra. Alma Georgina Navarrete
Alcalá

Miembro del Comité



Dr. Everardo Inzunza González
Miembro del Comité



Dr. Óscar López Bonilla
Miembro del Comité

Ensenada, Baja California, Mexico, Noviembre 2022.

RESUMEN de la tesis de **Paola Góngora Lugo**, presentada como requisito para obtener el grado de **DOCTOR en CIENCIAS**, del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, Baja California México, Noviembre 2022.

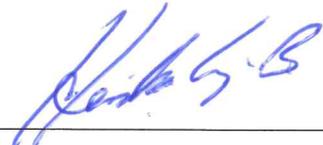
Diseño de rejillas de acoplamiento fibra a guía de onda.

Resumen aprobado por:



Dr. Enrique Efrén García Guerrero

Director de tesis



Dr. Heriberto Márquez Becerra

Co-Director de tesis

La cantidad de información y datos generados de equipos de computadoras, nubes de almacenamiento de datos y teléfonos móviles sigue incrementándose rápidamente y ha generado congestión en las comunicaciones. Una parte importante para mejorar las comunicaciones son las interconexiones ópticas, incluyéndolas en tecnología híbrida llamada optoelectrónica, en microdispositivos de silicio tipo CMOS y realizar funciones de comunicación de óptica a microescala y aumentar el ancho de banda de operación de los dispositivos. Tales funciones se puede realizar por medio de guías de onda angostas, resonadores de anillo y acopladores de rejilla de fibras a guías de onda. En esta tesis se presenta el diseño de rejillas de acoplamiento tipo binaria y sinusoidal, para guías de onda submicrón de $Al_2O_3/SiO_2/Si$ operando en visible (633 nm) e infrarrojo (1550nm). En particular se analiza la eficiencia de acoplamiento y desacoplamiento por medio de un software de fotónica basado en un algoritmo de elementos finitos (COMSOL, por sus siglas en inglés), en función de los principales parámetros físicos de la rejilla: espesor de las guías de onda, período, profundidad de grabado y ángulo de incidencia del haz, proveniente de la fibra óptica. Se presenta una comparación de los resultados con respecto a los dos tipos de rejillas (binaria y sinusoidal). La eficiencia de las rejillas de acoplamiento y desacoplamiento lograda para ambas longitudes de onda es adecuada y muy superior a la eficiencia típica que se puede tener con un acoplamiento directo fibra óptica a guía de onda debido a la discrepancia de tamaños de los núcleos de ambas componentes.

Palabras clave: Guía de onda submicrón; rejilla de acoplamiento; Al_2O_3 .

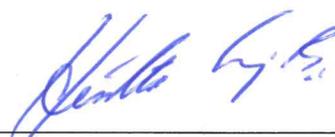
Thesis **ABSTRACT** of Paola Góngora Lugo, presented as requirement to obtain the degree of **DOCTOR in SCIENCES**, from the program of Master and Doctorate in Sciences and Engineering of Autonomous University of Baja California. Ensenada, Baja California México, November 2022.

Design of grating coupling for optical waveguides.

Abstract approved by:



Dr. Enrique Efrén García Guerrero
Thesis supervisor



Dr. Heriberto Márquez Becerra
Thesis supervisor

The amount of information and data generated from computer equipment, data storage clouds and cell phones continues to increase rapidly and has led to congestion in communications. An important part of improving communications is optical interconnects, including them in hybrid technology called optoelectronics, in CMOS-type silicon microdevices and realizing microscale optical communication functions and increasing the operating bandwidth of the devices. Such functions can be realized by means of narrow waveguides, ring resonators and fiber-to-waveguide grating couplers. In this thesis, the design of binary and sinusoidal type coupling gratings for $Al_2O_3/SiO_2/Si$ submicron waveguides operating in visible (633 nm) and infrared (1550nm) is presented. In particular, the coupling and decoupling efficiency is analyzed by means of a photonics software based on a finite element algorithm (COMSOL), as a function of the main physical parameters of the grating: thickness of the waveguides, period, etching depth and angle of incidence of the beam, coming from the optical fiber. A comparison of the results with respect to the two types of gratings (binary and sinusoidal) is presented. The efficiency of the coupling and decoupling gratings achieved for both wavelengths is adequate and far superior to the typical efficiency that can be obtained with a direct fiber optic to waveguide coupling due to the discrepancy in the size of the cores of both components.

Keywords: Submicron optical waveguide; grating coupler; Al_2O_3 .

Dedicatoria y agradecimientos

Agradezco a Dios y a todas las personas que hicieron posible la finalización de esta etapa, en especial a mi mamá Norma y a mi hermana Abril. Agradezco también, al Dr. Enrique Efrén García Guerrero, al Dr. Heriberto Márquez Becerra, director y co-director de tesis respectivamente, quienes creyeron en mi y me dieron la oportunidad de culminar este proyecto por el cual he perseverado arduamente, asimismo a los sinodales por su apoyo, guía y revisión durante los estudios y el trabajo de tesis de doctorado, el Dr. Everardo Inzunza González, la Dra. Alma Georgina Navarrete Alcalá, el Dr. Oscar Roberto López Bonilla, y en especial a la Dra. Elena Tchaikina Kolesnikova, quien me guió en medio de este desafío y siempre agradeceré por su apoyo incondicional.

Al Laboratorio Nacional de Nanofabricación del Departamento de Óptica de CICESE, por permitir uso del laboratorio y equipo.

Quiero hacer mención por la ayuda brindada de mis amigos Iván Partida, así como de aquellos que nunca dejaron de creer en mi, Samara Vilchis, Brenda Martín, José Jaime Esqueda y Diego Trujillo.

Agradezco a mi alma máter, la Universidad Autónoma de Baja California por brindarme la beca al mérito académico, con la cual pude cursar este grado.

Espero que haber terminado este grado, pueda servir de ejemplo para aquellos que quieren desistir de seguir sus objetivos, nunca se rindan que el esfuerzo da frutos.

Tabla de Contenido

Abstract	III
1. Introducción	1
1.1. Estado del Arte	3
1.2. Antecedentes	4
1.3. Planteamiento del problema	8
1.4. Hipótesis	9
1.5. Objetivo	9
1.5.1. Objetivos particulares	9
2. Rejillas de acoplamiento	10
2.1. Principio de operación	10
2.2. Diagramas en el espacio k.	14
2.3. Método de elementos finitos.	15
3. Diseño de acopladores de rejilla	16
3.1. Parámetros físicos	16
4. Resultados del acoplador de rejilla	20
4.1. Análisis de eficiencia a $\lambda = 1550$ nm.	20
4.2. Análisis de eficiencia a $\lambda = 633$ nm.	29
5. Conclusiones	36

Lista de Figuras

1. Secciones transversales de una fibra óptica y una guía de onda. (a) Núcleo de la fibra $8 \mu\text{m}$, (b) Núcleo de la guía de onda de espesor mejor de $1 \mu\text{m}$. Marchetti et al. (2016).	2
2. Acoplamiento lateral fibra a guía de onda. Marchetti et al. (2016).	2
3. Acoplamiento vertical de fibra óptica a guías de onda usando acopladores de rejillas de difracción, adaptado de Marchetti et al. (2016).	3
4. Configuraciones típicas usadas en acopladores de guías de onda de rejillas de difracción. (a) Rejilla uniforme, (b) Rejilla tipo sierra, (c) Rejilla inclinada, (d) Rejilla uniforme con sobrecapa, (e) Rejilla con apodización lineal, (f) Rejilla con doble grabado, adaptado de Marchetti et al. (2016).	4
5. Diagrama esquemático de la geometría de un acoplamiento de fibra a guía. Xu et al. (2010)	11
6. Geometría de una rejilla bidimensional en relieve. Harper (2003)	12
7. Diagrama de los diferentes órdenes difractivos y representados en el espacio k. Harper (2003)	13
8. Diagrama en el espacio k, y su equivalente en el espacio real. Harper (2003) .	14
9. Diagrama para la optimización del acoplamiento de una fibra-guía, a través de una rejilla de difracción.	16
10. Puntos de análisis del campo eléctrico.	17

11.	Diagrama esquemático de la geometría de acoplamiento de fibra a guía, por medio de una rejilla de acoplamiento binaria.	17
12.	Diagrama esquemático de la geometría de acoplamiento de fibra a guía, por medio de una rejilla de acoplamiento sinusoidal.	18
13.	Campo eléctrico normalizado vs. espesor de la guía de onda, para rejilla binaria y sinusoidal, a $\lambda = 1550$ nm.	18
14.	Campo eléctrico normalizado vs. espesor de la guía de onda, para rejilla binaria y sinusoidal, a $\lambda = 633$ nm.	19
15.	Variación del período con respecto el ángulo de incidencia para una guía de onda de $H = 900$ nm, a $\lambda = 1550$ nm. El ángulo $\theta = 30^0$ corresponde a un período de $\Lambda = 1350$ nm.	21
16.	Campo eléctrico normalizado vs. período de acoplamiento, $\Lambda = 1570$ nm para ambas rejillas.	21
17.	Campo eléctrico normalizado vs. profundidad de grabado, $h = 425$ y $h = 550$ para la rejilla binaria y sinusoidal, respectivamente.	22
18.	Campo eléctrico normalizado vs. ángulo de incidencia, $\theta = 30^0$ y $\theta = 31^0$, para la rejilla binaria y sinusoidal, respectivamente.	23
19.	Simulación del haz Gaussiano con ángulo de incidencia $\theta = 30^0$ y línea donde se calculó el flujo de la potencia del haz incidente.	24
20.	Perfil del flujo de potencia incidente.	24
21.	Cortes transversales en la guía de onda, donde se calcula el flujo de potencia (L1 y L2).	25
22.	Perfiles de potencia a través de la línea L1 en la guía de onda.	25
23.	Perfiles de potencia a través de la línea L2 en la guía de onda.	26
24.	Campo eléctrico normalizado vs. período de desacoplamiento, $\Lambda = 1135$ nm y $\Lambda = 1190$ nm, para rejilla binaria y sinusoidal, respectivamente.	26
25.	Campo eléctrico normalizado vs. profundidad de grabado, $h = 475$ nm y $h = 600$ nm, para rejilla binaria y sinusoidal, respectivamente.	27
26.	La línea L3, posición donde se calcula el flujo de potencia saliente de la segunda rejilla.	27
27.	Flujo de potencia de desacoplamiento.	28
28.	Distribución de intensidad del interconector óptico con rejillas binarias de acoplamiento de entrada y salida, con los parámetros físicos óptimos, a $\lambda = 1550$ nm.	28
29.	Distribución de intensidad del interconector óptico con rejillas sinusoidales de acoplamiento de entrada y salida, con los parámetros físicos óptimos, a $\lambda = 1550$ nm.	29
30.	Variación del período con respecto al ángulo de incidencia para una guía de onda de $H = 350$ nm, a $\lambda = 633$ nm. El ángulo $\theta = 30^0$ corresponde a un período de $\Lambda = 615$ nm.	29
31.	Campo eléctrico normalizado vs. período de acoplamiento, para $\Lambda = 705$ nm para ambas rejillas binaria y sinusoidal.	30
32.	Campo eléctrico normalizado vs. profundidad de grabado, con $h = 140$ nm para ambas rejillas binaria y sinusoidal.	31
33.	Campo eléctrico normalizado vs. ángulo de incidencia, con $\theta = 30^0$ y $\theta = 33.5^0$, para la rejilla binaria y sinusoidal, respectivamente	31
34.	Perfiles de potencia a través de la línea L1 en la guía de onda.	32

35.	Campo eléctrico normalizado vs. período de desacoplamiento, con $\Lambda= 590$ nm y $\Lambda= 450$ nm, para la rejilla binaria y la rejilla sinusoidal, respectivamente.	32
36.	Campo eléctrico normalizado vs. profundidad de grabado, con $h= 140$ nm para ambas rejillas.	33
37.	Perfiles de potencia a través de la línea L2 en la guía de onda.	33
38.	Flujo de potencia de la rejilla de desacoplamiento.	34
39.	Distribución de intensidad del interconector óptico con rejillas binarias de acoplamiento de entrada y salida, con los parámetros físicos óptimos, a $\lambda = 633$ nm.	34
40.	Distribución de intensidad del interconector óptico con rejillas sinusoidales de acoplamiento de entrada y salida, con los parámetros físicos óptimos, a $\lambda = 633$ nm.	35

Lista de Tablas

1.	Parámetros iniciales de la rejilla de acoplamiento para una $\lambda= 1550$ nm.	20
2.	Parámetros iniciales de la rejilla de acoplamiento para una $\lambda= 633$ nm.	30

Capítulo I

1. Introducción

Las telecomunicaciones modernas requieren importantes avances tecnológicos para hacer frente al enorme crecimiento de los datos que se transmiten por las redes, impulsado principalmente por las aplicaciones móviles, la transmisión de vídeo y los servicios en la nube. Las tecnologías ópticas ya han revolucionado el campo de las comunicaciones, permitiendo una moderna transmisión transoceánica de gran ancho de banda a través de fibras ópticas. En la última década, la fotónica de silicio se ha consolidado como plataforma para la realización de transceptores ópticos y procesadores ópticos, con el objetivo de proporcionar componentes de bajo costo y alto rendimiento para aplicaciones de telecomunicaciones y datacom. Utilizando guías de onda de silicio (Si) como elemento básico Wen et al. (2022); Mogami et al. (2018); Atabaki et al. (2018), se pueden implementar una gran variedad de componentes ópticos, tales como acopladores direccionales Benedikovic et al. (2014), derivadores en Y Blumenthal (2020), rejillas de Bragg de guía de onda distribuidas Alonso-Ramos et al. (2011c) y arreglo de rejillas de guías de onda (AWG) Zhang et al. (2015). Se han demostrado estructuras interferométricas como los interferómetros de Mach-Zehnder Marchetti et al. (2016) y los resonadores de anillo Chang et al. (2020); Xu et al. (2007), y también se han implementado diversos moduladores ópticos de alta velocidad Liu et al. (2013); Gartmann and Kehl (2015). Aunque la fotónica de silicio puede considerarse ahora una plataforma tecnológica madura, su compatibilidad con los componentes de fibra óptica sigue siendo relativamente limitada, sobre todo debido al gran desajuste de tamaño entre las fibras ópticas y las distribuciones modales de las guías de onda fotónicas de silicio, mostrado en la Fig. 1. Por ello, el acoplamiento de la luz de fibras ópticas a los componentes fotónicos de silicio sigue siendo un reto importante. Una aproximación tecnológica para abordar este problema es por medio de acoplamiento lateral y acoplamiento vertical:

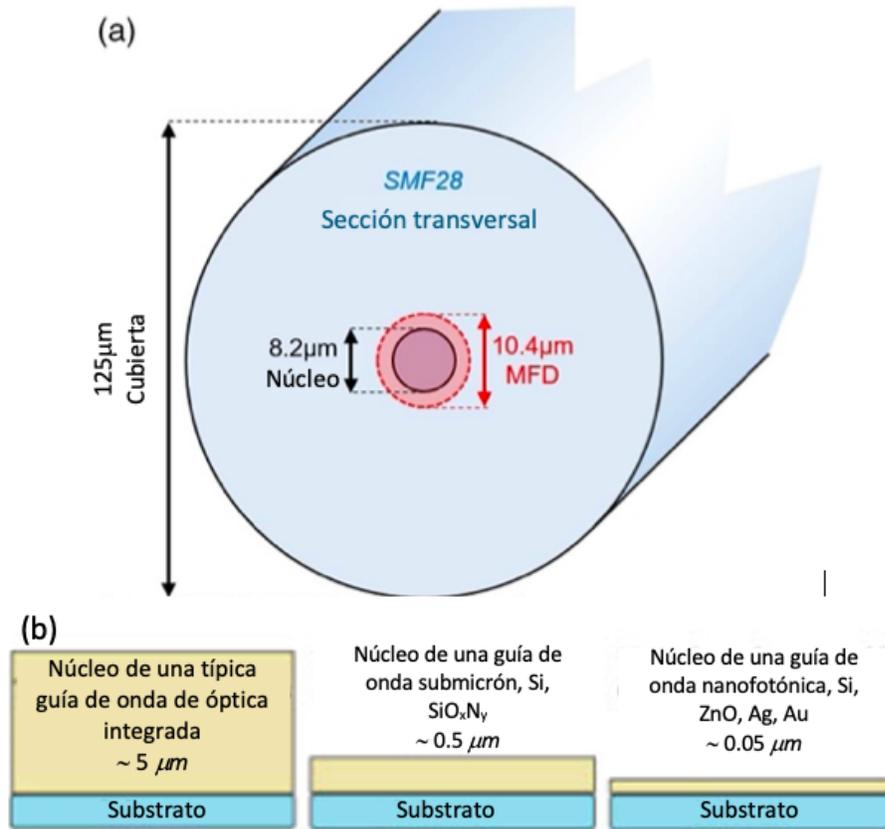


Figura 1: Secciones transversales de una fibra óptica y una guía de onda. (a) Núcleo de la fibra $8 \mu\text{m}$, (b) Núcleo de la guía de onda de espesor mejor de $1 \mu\text{m}$. Marchetti et al. (2016).

Acoplamiento lateral

En este caso, como se puede ver en la Fig. 2, el haz de luz se acopla dentro/fuera de la guía de onda desde los lados extremos de la guía de onda, por lo que siempre se propaga en el mismo plano. Esta técnica suele requerir la preparación de facetas de calidad óptica en los lados del chip, para lograr eficiencias de acoplamiento con una dependencia insignificante de la polarización.

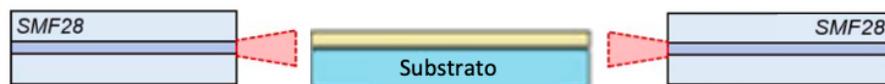


Figura 2: Acoplamiento lateral fibra a guía de onda. Marchetti et al. (2016).

Acoplamiento vertical.

Cuando se adopta esta técnica de la Fig. 3, el haz de luz incide desde la superficie superior del chip de silicio (o la inferior, si es necesario), y una estructura de acoplamiento

convenientemente diseñada modifica la dirección del vector k del haz de luz incidente, permitiendo el acoplamiento de la luz en la guía de onda integrada. La solución de acoplamiento vertical más adoptada se basa en rejillas difractivas; se caracteriza por tener mejor eficiencia de acoplamiento, mayor tolerancia de posicionamiento y una fabricación litográfica práctica. Por otro lado, las formas más sencillas de estas estructuras son intrínsecamente sensibles a la polarización y a la longitud de onda, y se requiere un diseño cuidadoso y una optimización para reducir el impacto de estas limitaciones. De ahí su importancia y necesidad de realizar un estudio de este tipo de acopladores de guías de onda basados en rejillas de difracción.

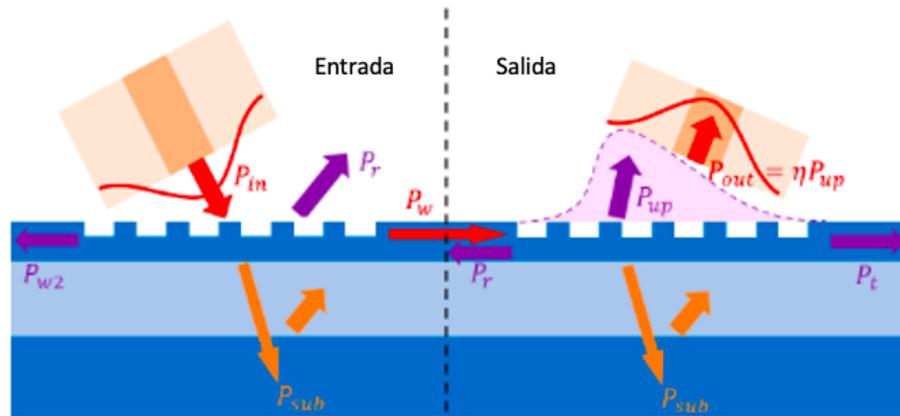


Figura 3: Acoplamiento vertical de fibra óptica a guías de onda usando acopladores de rejillas de difracción, adaptado de Marchetti et al. (2016).

1.1. Estado del Arte

En los últimos 20 años, la fotónica de silicio ha revolucionado el campo de la óptica integrada, proporcionando una plataforma avanzada para construir circuitos ópticos producibles en masa. Uno de los aspectos más atractivos de la fotónica de silicio es su capacidad para proporcionar componentes ópticos extremadamente pequeños, cuyas dimensiones típicas son un orden de magnitud que las de los dispositivos de fibra óptica. Esta diferencia de dimensiones hace que el diseño de interfaces de fibra a chip sea un reto y, a lo largo de los años, ha estimulado considerables esfuerzos técnicos y de investigación. Un área que ha sido importante es el desarrollo de acopladores de guías de onda basados en rejillas de difracción; dentro de las posibles alternativas de diseño que han sido exploradas destacan: a) acoplador de rejilla uniforme, b) acoplador tipo sierra, c) acoplador de rejilla inclinado, d) acoplador de rejilla uniforme con sobrecapa, e) acoplador de rejilla apodizada, (f) acoplador de rejilla

doblemente grabada y (g) acoplador de rejilla de nano-huecos de metamaterial.

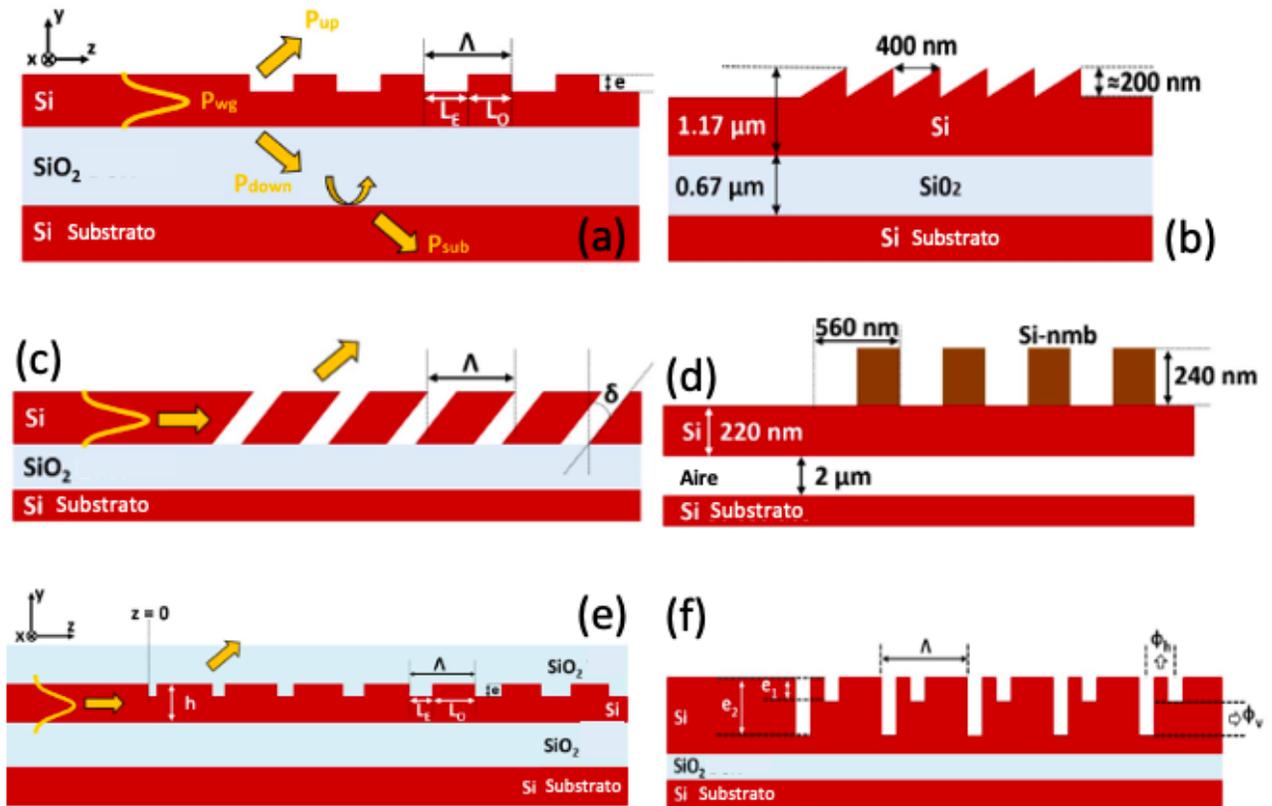


Figura 4: Configuraciones típicas usadas en acopladores de guías de onda de rejillas de difracción. (a) Rejilla uniforme, (b) Rejilla tipo sierra, (c) Rejilla inclinada, (d) Rejilla uniforme con sobrecapa, (e) Rejilla con apodización lineal, (f) Rejilla con doble grabado, adaptado de Marchetti et al. (2016).

1.2. Antecedentes

Las rejillas de difracción son elementos ópticos pasivos que difractan la luz incidente en direcciones específicas, dependiendo de factores como el ángulo de incidencia, la longitud de onda incidente y las características físicas propias de la rejilla. Existen diferentes tipos de rejillas y pueden fabricarse con diversos métodos y materiales. Es común encontrar esta clase de elementos difractivos dentro de dispositivos como los monocromadores y demultiplexores, o incluso verlos involucrados en biosensores de fibras ópticas y en procesos de sintonización láser, compresión y ensanchamiento de pulsos. Una forma que permite interactuar a un dispositivo de fibra óptica con un circuito fotonico integrado es a través de un acoplador de fibra a guía de onda por medio de rejillas de difracción.

Existen varios factores que afectan la eficiencia de acoplamiento de un haz de luz de una

fibra óptica a una guía de onda. Uno de ellos, es la reflexión del segundo orden de Bragg en la guía de onda, que se puede reducir inclinando la fibra óptica a un ángulo $\theta = 10^\circ$, con respecto a la normal de la superficie. Otra característica que ayuda al mejoramiento de la eficiencia de la potencia, es hacer el grabado de las rejillas a poca profundidad y aumentar la direccionalidad de la rejilla. Otro factor que mejora la transferencia de potencia, es logrando que el perfil de intensidad del haz difractado desde el acoplador de rejilla, sea similar al del modo gaussiano de la fibra óptica Chen et al. (2012).

Por otro lado, se necesita evitar que la rejilla de difracción se acople a un régimen multimodal de propagación de la guía de onda ya que reduce la eficiencia de acoplamiento. Se han realizado diferentes trabajos, donde se diseñan rejillas de difracción para evitar que la estructura conjunta se convierta en multimodal. En Alonso-Ramos et al. (2011a) utilizan un cono invertido que evita la excitación de modos de orden superior en guías de onda de costilla.

Otro factor importante para optimizar el diseño de rejillas de difracción son los parámetros del período y el factor de llenado. En Larrea-Luzuriaga et al. (2016), proponen expresiones analíticas que se basan en la ecuación de acoplamiento de la rejilla, para obtener con precisión el período y el factor de relleno óptimos, reduciendo el tiempo de simulación.

En Harper (2003), realizaron un análisis riguroso de la rejilla de acoplamiento, primero fue para conocer la relación entre la longitud del período de la rejilla y el acoplamiento a incidencia normal a la superficie, y segundo con un ángulo de inclinación θ . Concluyen que a incidencia normal, al disminuir el período de la rejilla, los órdenes difractivos distintos del orden cero, no se encuentran dentro de la guía. El punto de corte de esos órdenes depende del índice de refracción del medio transmitido, cuanto mayor sea el índice de refracción del medio transmitido, menor será el período de la rejilla antes de que se corten los órdenes difractivos de ese medio. Por lo que el índice efectivo de refracción es una poderosa herramienta de diseño que permite elegir los parámetros de diseño. Y cuando se tiene un ángulo de incidencia θ , el acoplamiento del modo guiado se produce si el índice efectivo está entre el índice de la guía de onda y el índice del sustrato. La combinación correcta del ángulo de incidencia y el periodo de la rejilla nos permite diseñar un acoplador de rejilla que acopla la luz en una guía monomodo.

El diseño de rejillas, incluye diferentes geometrías con características que aumentan la

eficiencia de acoplamiento. Por un lado, se tienen las rejillas de difracción apodizadas, las cuales reducen la reflexión posterior Chovan et al. (2013), maximizan la direccionalidad de la rejilla (potencia acoplada) Schmid et al. (2014). Las técnicas para la fabricación de este tipo de rejillas incluye litografía DUV de láser Chovan et al. (2013), litografía por haz de electrones y a través de tecnología CMOS Wang et al. (2015), la cual es de alta calidad y bajo costo. También incluyen rejillas escalonadas, como en Benedikovic et al. (2014), donde se demostró la necesidad de ajustar el ángulo de incidencia en el acoplador de rejilla escalonada para aumentar la eficiencia de acoplamiento para una guía de onda de espesor arbitrario.

Entre las aplicaciones importantes de las rejillas de acoplamiento, están el de divisor de polarización. En Tang et al. (2009); Wang et al. (2009), presentan una guía de onda de rejilla, que sirve para ambos casos. La luz que proviene de la fibra se acopla al chip de SOI, y las dos ondas polarizadas ortogonalmente se separan para viajar hacia direcciones opuestas.

Las aplicaciones de los interconectores ópticos, no sólo abarcan el tema de las comunicaciones, también son de utilidad en sistemas ópticos de alto rendimiento que operan en el infrarrojo medio (MIR) Hattasan et al. (2012); Cheng et al. (2012), para experimentos astronómicos, la espectroscopía de enlaces químicos, las imágenes térmicas, etc. Cuando se trabaja en estas longitudes de onda largas, reduce la absorción no lineal del Si y la de dos fotones. En biosensores es importante entender los procesos a nivel microscópico, y aquí es donde son útiles los dispositivos y técnicas ópticas basadas en guías de onda para la investigación de las células.

En el espectro visible, las rejillas de difracción son importantes para aplicaciones como la detección y la espectroscopía, en particular la biodetección. En estas longitudes de onda, se evita la absorción de agua, lo que evitaría el daño a las células. A pesar de esto, el reto es el tamaño del dispositivo, ya que se debe implementar en un chip de aproximadamente 100 nm. Además que en el visible, el silicio tiene una fuerte absorción. Por otro lado, el nitruro de silicio tiene un amplio espectro y es biocompatible con el proceso CMOS. En Gali et al. (2019), presentan un diseño de la guía de onda y rejilla de acoplamiento, la fabricación y la demostración del dispositivo en longitudes de onda de 520 nm.

Los biosensores, se basan en el uso rejillas de difracción de guías de onda para detectar objetivos biológicos y vías de señalización celular dentro de las células vivas Velasco-Garcia (2009). Para lograrlo, los biosensores de rejilla se basan en la interacción de la onda evanes-

cente transmitida por una guía de onda óptica con la muestra que se localiza sobre la rejilla Chen et al. (2012).

En Xu et al. (2007) se fabricó un biosensor interferométrico par detectar directamente la gripe aviar, mediante la captura del virus en una guía de onda. Se logra esta respuesta, debido a los cambios en el índice de refracción que produce la unión de las partículas del virus a los anticuerpos de la proteína hemaglutina localizada en la superficie de la guía de onda.

Otros trabajos notables, son aquellos donde utilizan materiales diferentes al Si para aplicaciones fotónicas, tal es el caso de Baghban et al. (2017), donde elaboraron guías de onda de niobato de Litio (LiNbO_3 , NL) por medio de litografía de haz de electrones y grabado iónico reactivo, debido al alto contraste en el índice de refracción del NL y el aislante SOI. El germanio sobre el silicio también es un material muy estudiado, debido a su amplio rango de transparencia en el IR y sus bajas pérdidas Nedeljkovic et al. (2015). El dióxido de titanio TiO_2 , también es un material innovador para la elaboración de acopladores ópticos, está caracterizado por un índice de refracción alto y propiedades térmicas, mecánicas y ópticas Ptasinski et al. (2010). En Zhang et al. (2015), presentan un acoplador de rejilla de Si de alta eficiencia sobre zafiro, a una longitud de onda de $2.7 \mu\text{m}$.

El fosforo de indio (InP), es un material de índice de refracción de alto contraste, en Taillaert et al. (2006) estudiaron guías de onda con rejillas de difracción de este material, utilizaron una rejilla muy corta, con un acoplamiento grande. Logran un ancho de banda muy amplio, y el proceso de fabricación utilizado fue por medio de litografía y grabado.

Otro material utilizado en las guías de onda y los acopladores de rejillas, son los polímeros, los cuales resultan prometedores en tecnologías para sistemas de detección biofotónicos integrados. Con el avance en nuevos materiales y técnicas de depósito, como el estampado rápido, ahora es posible elaborar un patrón directo de dispositivos ópticos de polímeros de alto índice de refracción en CYTOP, y generar guías de onda simétricas con cubiertas de índice de refracción superiores al agua Diez et al. (2018).

Las rejillas de difracción tienen una amplia gama de aplicaciones, primordialmente en el área de telecomunicaciones. Muchos trabajos muestran acopladores de rejilla con eficiencias y anchos de banda de alto rendimiento. Las rejillas de difracción tienen el potencial de mejorarse aún más, perfeccionando su diseño. Con las mejoras en las técnicas de litografía,

se podrá tener un mejor control en los parámetros de fabricación. Estos dispositivos ópticos, son considerados la tecnología que promete la mejora de los sistemas integrados.

En esta tesis, se presenta el diseño de acopladores de rejilla tipo binario y sinusoidal, para trabajar en longitudes de onda de visible (633 nm) y NIR (1550 nm). Se analizará la eficiencia de acoplamiento y desacoplamiento, por medio de la simulación de elemento finito, en función de los principales parámetros físicos de las rejillas: espesor de las guías de onda, período, profundidad de grabado y ángulo de incidencia del haz de la fibra óptica.

Este documento está organizado de la manera siguiente: en la sección 2 se describe la teoría de las rejillas de acoplamiento. En la sección 3 se presenta el diseño de los acopladores de rejilla, se describe cómo varían los parámetros físicos de la rejilla de acoplamiento. En la sección 4 se presentan los resultados de la simulación, y se hace una comparación entre los diferentes tipos de rejillas, a las diferentes longitudes de onda. Finalmente, en la sección 5, se resumen las conclusiones del trabajo.

1.3. Planteamiento del problema

Los dispositivos ópticos integrados se han convertido en la plataforma más prometedora teniendo un progreso significativo, debido a su alta capacidad de interconexión, alta densidad en superordenadores y centros de datos, su amplia gama de aplicaciones y también a su bajo costo en escala chip. Debido a las modernas tendencias de miniaturización y fabricación en masa, existen retos a nivel circuito, ya que los conceptos de dispositivos eficientes son sensibles a la polarización, la longitud de onda, la temperatura y la variación de fabricación a escala nanométrica Bamiedakis et al. (2013). Otro problema, consiste en el acoplamiento de la luz entre las fibras ópticas y las guías de onda, ya que hay un orden de magnitud entre ambos. Existen dos tipos de acoplamiento entre éstos; el lateral, el cual acopla la luz de la fibra monomodo al modo fundamental de la guía de onda a través de una estructura cónica. Por otro lado, el acoplamiento vertical que utiliza una estructura de rejilla de Bragg de guía de onda para difractar la luz que proviene de la fibra monomodo en la guía de onda. La ventaja de ésta última es la amplia tolerancia de alineación y la compatibilidad con los procesos de fabricación y empaquetamiento, ya que no requieren del proceso de pulir las caras de la guía, y la tolerancia de colocar la salida óptica en cualquier lugar del chip. El reto con los acopladores de rejilla, es mejorar la eficiencia de acoplamiento, el ancho de banda, la

dependencia de la polarización, el desajuste entre los modos de la fibra y el modo de la rejilla Chen et al. (2010).

1.4. Hipótesis

La optimización de rejillas de acoplamiento y desacoplamiento (binarias y sinusoidales), permitirá la mejora en la eficiencia de la propagación de la luz dentro de la guía de onda submicrón $Al_2O_3/SiO_2/Si$, operando en visible (633 nm) e infrarrojo (1550nm).

1.5. Objetivo

Diseñar acopladores de rejilla de guías de onda submicrón tipo binario y sinusoidal, colocados sobre una guía de onda submicrón de $Al_2O_3/SiO_2/Si$, para longitudes de onda de visible (633 nm) y NIR (1550 nm), que permitan el acoplamiento y desacoplamiento del haz de fibra-guía.

1.5.1. Objetivos particulares

- Determinar el espesor de las guías, el período, la profundidad de grabado, el ángulo de incidencia y la eficiencia de las rejillas de acoplamiento binaria y sinusoidal para las longitudes de onda del visible (633 nm) y NIR (1550 nm).
- Determinar el período, profundidad de grabado y eficiencia de la rejilla de desacoplamiento (binaria y sinusoidal), para las longitudes de onda visible (633 nm) y NIR (1550 nm).

Capítulo II

2. Rejillas de acoplamiento

En esta sección se presentan los principales parámetros del principio de operación de la rejilla de acoplamiento fibras a guías de onda

2.1. Principio de operación

El acoplamiento fibra-chip se puede realizar por medio de dos técnicas; una es el acoplamiento lateral a la guía de onda, donde se utiliza una sección de la guía para convertir el tamaño del modo que proviene de la fibra y el modo de la guía de onda, pero limita la colocación de la entrada/salida al borde del chip, adicionando que se necesitan pulir las caras de la guía; la otra técnica es el acoplamiento de la luz por medio de rejillas colocadas sobre la superficie de la guía de onda, la cual supera las limitaciones de la primera técnica, además de que se puede probar a escala de oblea y el fácil diseño del circuito Cheng et al. (2012). Un acoplador de rejilla es una estructura periódica localizada sobre una guía de onda, para acoplar/desacoplar la luz a un circuito de óptica integrada por medio de una fibra óptica colocada sobre la rejilla de acoplamiento. La idea es que el acoplador de rejilla, genere un haz de radiación acoplado al modo fundamental de la guía de onda Alonso-Ramos et al. (2011b). El acoplamiento de la luz de una fibra óptica a una guía de onda se alcanza cuando un orden de difracción cumple con las condiciones del índice efectivo de un modo de propagación de la guía de onda, permitiendo que la luz viaje confinada por la guía Harper (2003). La eficiencia de acoplamiento se define como la potencia acoplada desde la fibra óptica al modo de la guía de onda (o viceversa), y está determinada principalmente por la direccionalidad de la rejilla, la potencia reflejada desde la rejilla hacia la guía de onda y el traslape entre el modo radiado y el modo de la fibra Xu et al. (2010). La Fig. 5 muestra un acoplador de rejilla sobre una guía de onda.

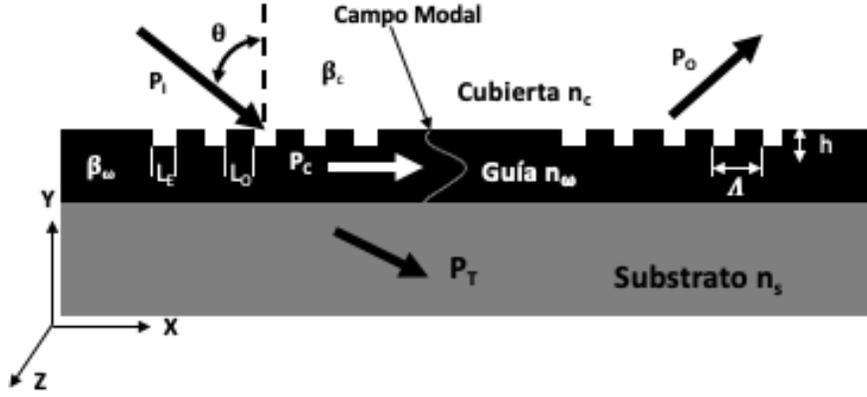


Figura 5: Diagrama esquemático de la geometría de un acoplamiento de fibra a guía. Xu et al. (2010)

El funcionamiento de como interactúan las rejillas para redirigir la luz incidente en órdenes difractivos es el siguiente. El vector del modo k de la guía de onda y la variación en el periodo de la rejilla se localizan hacia el eje x . La profundidad de grabado de la rejilla esta dado por h , que forma la parte grabada L_E y la parte no grabada L_O . El periodo de la rejilla Λ , que corresponde a la longitud de un elemento de dispersión se expresa así:

$$\Lambda = L_E + L_O. \quad (1)$$

El factor de llenado de la rejilla (FF) indica la razón entre L_O y el período de la rejilla Λ :

$$FF = \frac{L_O}{\Lambda} = \frac{L_O}{L_O + L_E}. \quad (2)$$

El índice de refracción efectivo del 1er. orden de la rejilla, se determina por el índice efectivo de la sección grabada (n_E) y la sección no grabada (n_O):

$$n_{eff} = FF \bullet n_O + (1 - FF) \bullet n_E. \quad (3)$$

El incremento en la profundidad de grabado h conduce a una reducción de n_E , y también n_{eff} varía conforme a los parámetros FF y h .

El proceso de acoplamiento de las rejillas para redirigir la luz incidente es la adición discreta de múltiplos enteros del vector de la rejilla, al vector de onda transmitido no difractado, Fig. 6, es decir, tiene que cumplir la condición de Bragg, en la que se describe la relación

entre el vector de onda de la luz incidente y el vector de onda del haz difractado:

$$k_{m,z} = \beta - mK, \quad (4)$$

donde m es el orden de difracción, $k_{m,z}$ es la componente del vector de onda del i -ésimo orden difractado k_m en la dirección z , β es la constante de propagación del modo guiado y K representa el vector que caracteriza a la rejilla en la dirección z , que esta definido en magnitud como:

$$|K| = \frac{2\pi}{\Lambda}. \quad (5)$$

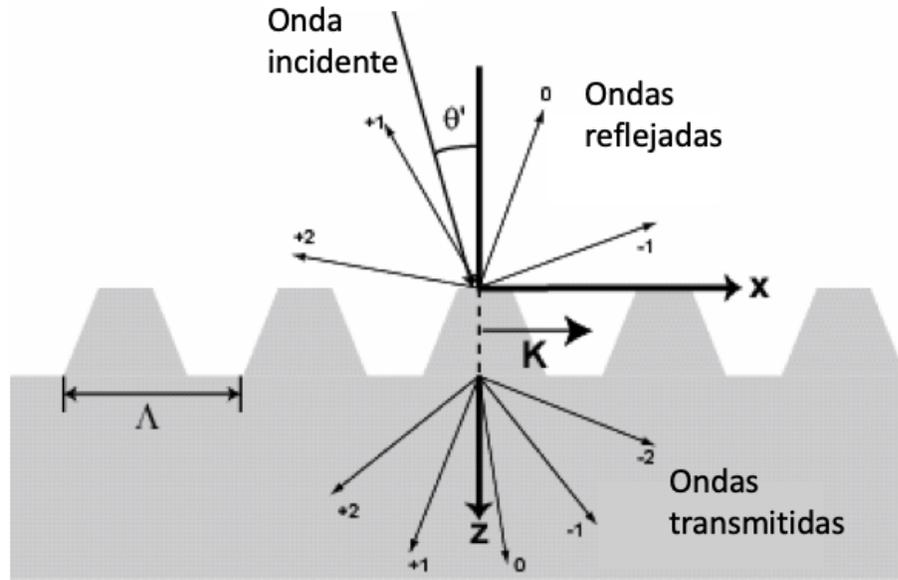


Figura 6: Geometría de una rejilla bidimensional en relieve. Harper (2003)

La magnitud del vector de onda k_m del orden i -ésimo se expresa como:

$$|k_m| = \frac{2\pi}{\lambda} n_{1,2}, \quad (6)$$

en el medio incidente n_1 y transmitido n_2 .

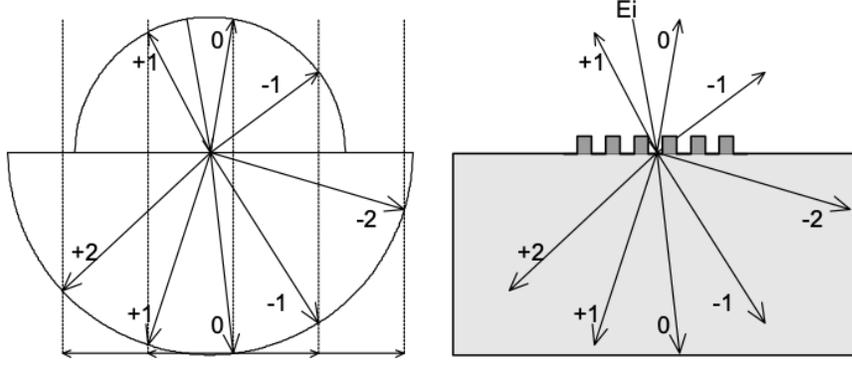


Figura 7: Diagrama de los diferentes órdenes difractivos y representados en el espacio-k. Harper (2003)

La constante de propagación de la guía de onda se determina por n_{eff} de la rejilla de difracción:

$$\beta[\omega] = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff}. \quad (7)$$

Para el caso donde se tiene una inclinación del haz con respecto a la normal de la superficie de la rejilla, la condición de Bragg queda así:

$$n_{eff} - n_1 \bullet \sin\theta = \frac{\lambda}{\Lambda}, \quad (8)$$

dónde θ , es el ángulo de desviación Xu et al. (2020).

Para determinar la eficiencia de acoplamiento η_C , es necesario obtener la relación entre la potencia de acoplamiento P_C y la potencia incidente P_I , ec. 9. La potencia P_T es la potencia que se pierde en el sustrato, como se muestra en la Fig. 5,

$$\eta_C = \frac{P_C}{P_I}, \quad (9)$$

mientras que la eficiencia de desacoplamiento η_d se calcula con la potencia que proviene desde la guía de onda P_{WG} y la potencia de desacoplamiento P_O ,

$$\eta_d = \frac{P_O}{P_{WG}}. \quad (10)$$

La eficiencia total en el dispositivo optoelectrónico es:

$$\eta_T = \frac{P_O}{P_I}. \quad (11)$$

2.2. Diagramas en el espacio k .

Las rejillas de difracción se pueden entender y analizar mediante el diagrama de vectores en el espacio k . Este diagrama, modela la transmisión y reflexión del rayo incidente debido al efecto de la rejilla de difracción, mediante el uso de círculos concéntricos cuyos radios representan la magnitud del vector de onda k en el medio. Cada rayo de magnitud k se dirigen hacia el centro del círculo y se aleja de él con ángulos que representan la dirección de propagación. En el centro del diagrama se encuentra la rejilla de difracción. Por lo tanto, el haz difractado de orden m dentro del medio en cuestión, se puede demostrar en el diagrama por medio de la suma de m veces el vector K de la rejilla a la componente z del haz guiado por la onda. Enseguida, se traduce el resultado a las ondas difractadas y reflejadas reales, aplicando las condiciones de contorno para los campos eléctricos tangenciales, o la llamada adaptación de fase, que gráficamente significa trazar líneas verticales desde la punta del vector, a la frontera de los dos círculos. Cuando las líneas se cruzan con el círculo, entonces el haz difractado del orden m existe, Fig. 8 Xu et al. (2020); Harper (2003).

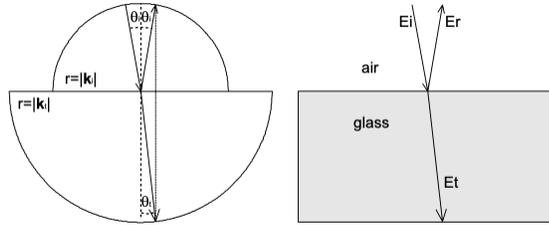


Figura 8: Diagrama en el espacio k , y su equivalente en el espacio real. Harper (2003)

En una rejilla de difracción, cuando el período es mucho menor que la longitud de onda de la luz que se propaga a través de esa estructura, es decir, en el régimen sublongitud de onda, los índices de refracción del material (n_{\parallel} , n_{\perp}) para polarización paralela y perpendicular, se aproximan mediante las fórmulas de Rytov Halir et al. (2014, 2018).

$$n_{\parallel}^2 = f_1 n_1^2 + (1 - f_1) n_2^2, \quad (12)$$

$$\frac{1}{n_{\perp}^2} = f_1 \frac{1}{n_1^2} + (1 - f_1) \frac{1}{n_2^2}, \quad (13)$$

donde $f_1 = a/\Lambda$ es el ciclo de trabajo de la estructura.

2.3. Método de elementos finitos.

El método de elementos finitos consiste en un procedimiento numérico para resolver problemas de muchas ramas de la ciencia y la ingeniería Kattan (2003). En resumen, los pasos en general para resolver cada problema es el siguiente:

1. Discretizar el dominio, este paso implica una subdivisión del dominio en elementos y nodos. En el caso de sistemas discretos, el sistema ya está discretizado, por otro lado, para sistemas continuos es necesaria la discretización y las soluciones que se obtienen son aproximaciones. La precisión de la solución depende de la discretización utilizada.
2. Selección de la función de interpolación, la función de interpolación se define solamente en cada subdominio y sólo contienen coeficientes.
3. Formulación del sistema para resolver el problema, en esta sección se tiene el sistema de ecuaciones representando la solución de campo, en ecuaciones matriciales globales Agrawal and Rahman (2013).
4. Establecer condiciones de contorno.
5. Resolver el sistema global de ecuaciones.

Capítulo III

3. Diseño de acopladores de rejilla

Es importante considerar un punto de partida para el diseño de los acopladores de rejilla; en este trabajo una vez definidos los parámetros físicos de la estructura de la guía de onda, el diseño del acoplador de rejilla inicia evaluando la dependencia del período de la rejilla con el ángulo de incidencia. Con estos valores, se evalúa la variación de la profundidad de la rejilla con respecto a la eficiencia de acoplamiento, como se muestra en la Fig. 9 .

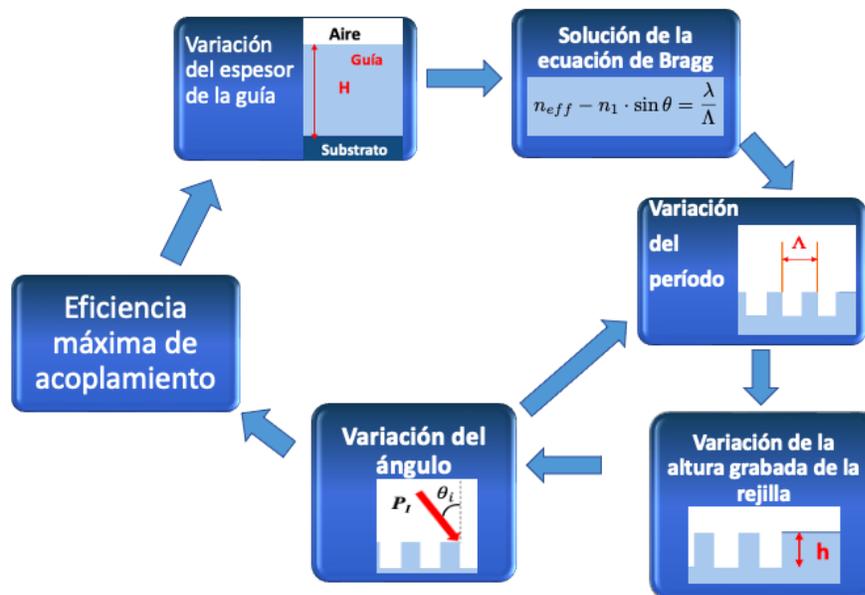


Figura 9: Diagrama para la optimización del acoplamiento de una fibra-guía, a través de una rejilla de difracción.

Después de encontrar la eficiencia máxima de acoplamiento de la primera rejilla, se calcula la eficiencia máxima de la segunda rejilla, variando únicamente los parámetros del período y la altura.

3.1. Parámetros físicos

Para estas simulaciones, se escogió la polarización TE, ya que la mayoría de los dispositivos SOI están diseñados para trabajar en este modo Zhang et al. (2020).

En este trabajo, se optimizan los parámetros físicos tomando mediciones de la amplitud

del campo eléctrico de la luz acoplada abajo de la primer rejilla (P1), en medio de las dos rejillas (P2) y arriba de la segunda rejilla (P3), mostradas en la Fig. 10, con las cuales se obtienen las condiciones de la eficiencia óptima de acoplamiento y desacoplamiento, de ambas rejillas.

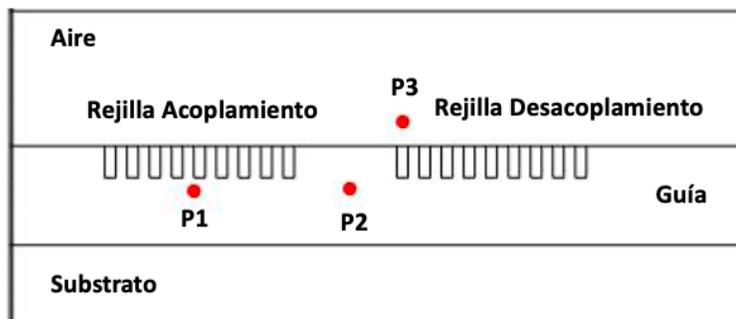


Figura 10: Puntos de análisis del campo eléctrico.

El interconector óptico en la Fig. 10, consiste en dos rejillas grabadas sobre una guía de onda de $Al_2O_3/SiO_2/Si$; la rejilla izquierda es la de acoplamiento y la segunda rejilla corresponde al desacoplamiento del haz que proviene de una fibra óptica localizada sobre de la rejilla de acoplamiento. El análisis de eficiencia se realizó para dos longitudes de onda: $\lambda = 1,55 \mu m$ y $\lambda = 0,633 \mu m$, y para dos tipos de rejillas de acoplamiento, la rejilla binaria, mostrada en la Fig. 11 y la rejilla sinusoidal, mostrada en la Fig. 12.

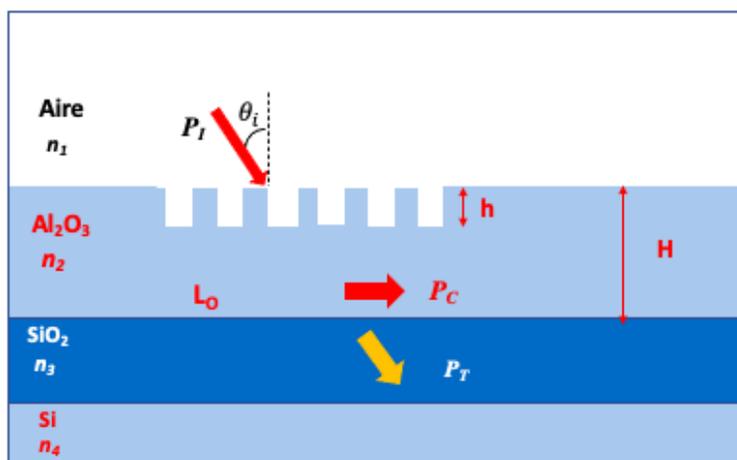


Figura 11: Diagrama esquemático de la geometría de acoplamiento de fibra a guía, por medio de una rejilla de acoplamiento binaria.

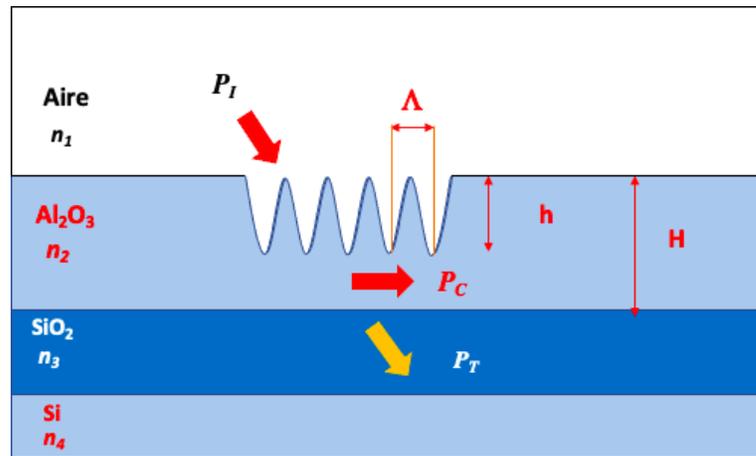


Figura 12: Diagrama esquemático de la geometría de acoplamiento de fibra a guía, por medio de una rejilla de acoplamiento sinusoidal.

Para cada una de las configuraciones anteriores (longitud de onda y tipo de rejilla), se realizó una variación del espesor de la guía, para obtener el espesor óptimo que mostró el mejor acoplamiento. En la Fig. 13 se muestra la amplitud del campo eléctrico en función de la variación del espesor de la guía, con rejillas binarias y sinusoidales, a una longitud de onda de $\lambda = 1550$ nm.

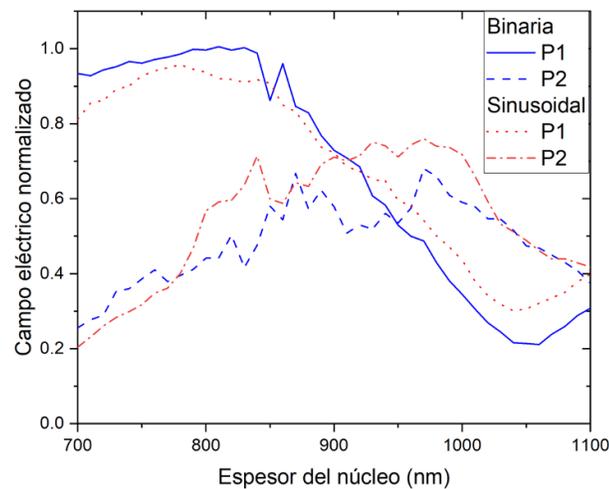


Figura 13: Campo eléctrico normalizado vs. espesor de la guía de onda, para rejilla binaria y sinusoidal, a $\lambda = 1550$ nm.

A partir de la simulación se determinó el espesor óptimo de la guía que mostró el mejor acoplamiento, el cual se encuentra a 900 nm, para ambos configuraciones de rejilla.

Por otro lado, a una longitud de onda de $\lambda = 633$ nm, la variación del campo eléctrico normalizado vs. el espesor de la guía de onda, se muestra en la Fig. 14.

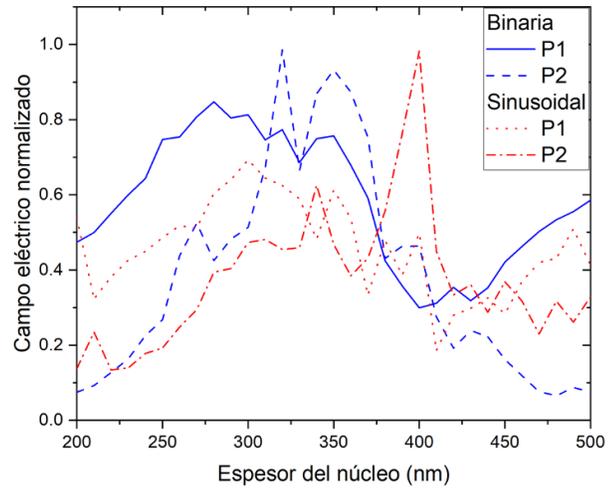


Figura 14: Campo eléctrico normalizado vs. espesor de la guía de onda, para rejilla binaria y sinusoidal, a $\lambda= 633$ nm.

El espesor que mostró el mejor acoplamiento, se encuentra a 350 nm, para ambas configuraciones de rejilla.

Capítulo IV

4. Resultados del acoplador de rejilla

Inicialmente se ha considerado que una buena estrategia de usar una rejilla de acoplamiento para una guía de onda es considerar una guía con un espesor que soporte uno o dos modos de propagación. En particular se está considerando que la región de rejilla en la guía sea sobrepuesta en forma análoga a un prisma de acoplamiento; de tal forma que al generar las condiciones de acoplamiento óptico se produzca un fenómeno similar al tunelaje óptico y que la rejilla acople la luz al modo de propagación de la guía de onda. Con estas consideraciones en cuenta, los parámetros iniciales de la guía de onda se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros iniciales de la rejilla de acoplamiento para una $\lambda = 1550$ nm.

Parámetros	Valor Inicial
Longitud de onda λ (μ m)	1.55
Índice de refracción Al_2O_3 (n_2)	1.74
Índice de refracción SiO_2 (n_3)	1.444
Índice de refracción Si (n_4)	3.4467
Espesor de la guía H (nm)	900

4.1. Análisis de eficiencia a $\lambda = 1550$ nm.

Un primer análisis para determinar el período de la rejilla de acoplamiento, es escoger un ángulo de incidencia del haz de la fibra óptica. A partir de la solución a la ec. 1, la cual se muestra en la Fig. 15, de la gráfica se determinó que para un ángulo de incidencia de 30° , le corresponde un período de $\Lambda = 1350$ nm.

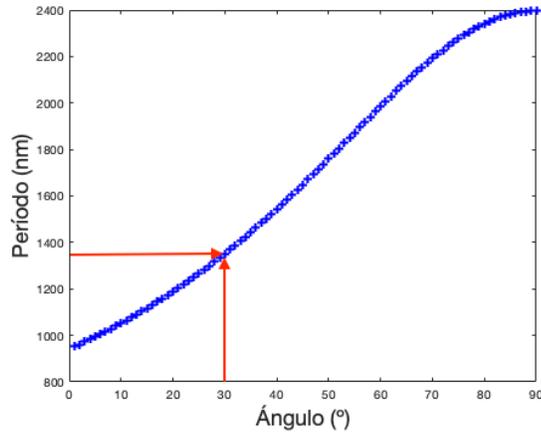


Figura 15: Variación del período con respecto el ángulo de incidencia para una guía de onda de $H= 900$ nm, a $\lambda= 1550$ nm. El ángulo $\theta= 30^0$ corresponde a un período de $\Lambda= 1350$ nm.

Para comenzar la simulación, se utilizaron los parámetros de inicio que se muestran en la Tabla 1.

En la Fig. 16 se presenta la curva de la variación de la amplitud del campo eléctrico, en los diferentes puntos de cálculo P1 y P2, en función del período de las rejillas de acoplamiento binaria y sinusoidal.

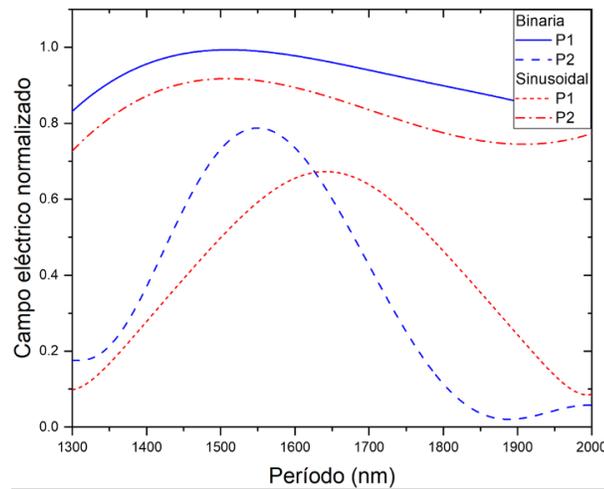


Figura 16: Campo eléctrico normalizado vs. período de acoplamiento, $\Lambda= 1570$ nm para ambas rejillas.

A una longitud de onda de $\lambda = 1550$ nm, la rejilla de acoplamiento binaria, el campo eléctrico máximo está en un período de $\Lambda = 1570$ nm, en el caso de la rejilla sinusoidal el campo eléctrico máximo está a un período de $\Lambda = 1705$ nm.

Los valores máximos del campo eléctrico alcanzados con un haz incidente de una longitud

de onda de 1550 nm, en los diferentes puntos de cálculo P1 y P2, para una rejilla binaria se encuentran a un período de $\Lambda = 1570$ nm y para una rejilla sinusoidal a una $\Lambda = 1705$ nm. La influencia de la variación de la profundidad de grabado de la rejilla sobre la amplitud del campo eléctrico para las posiciones P1 y P2 se presenta en la Fig. 17.

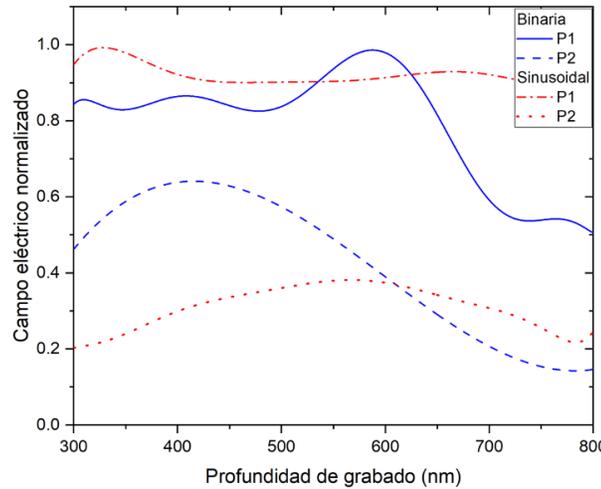


Figura 17: Campo eléctrico normalizado vs. profundidad de grabado, $h = 425$ y $h = 550$ para la rejilla binaria y sinusoidal, respectivamente.

En la rejilla binaria, el campo máximo en P1 y P2 se logra a una profundidad de grabado de $h = 475$ nm, por otro lado, con la rejilla sinusoidal el campo eléctrico máximo está en $h = 530$ nm.

En seguida, se realizó el análisis de la variación del campo eléctrico vs el ángulo de incidencia, en las posiciones P1 y P2, Fig. 18.

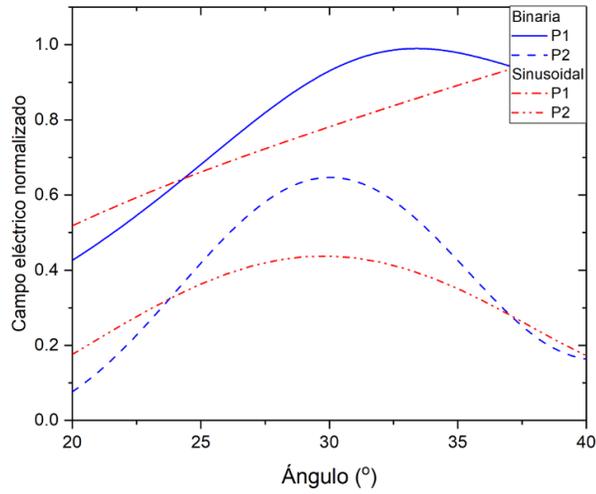


Figura 18: Campo eléctrico normalizado vs. ángulo de incidencia, $\theta = 30^\circ$ y $\theta = 31^\circ$, para la rejilla binaria y sinusoidal, respectivamente.

De la Fig. 18, se observa que los ángulos óptimos para la primer rejilla binaria es de $\theta = 30^\circ$ y para la primer rejilla sinusoidal es de $\theta = 31^\circ$.

Los parámetros óptimos obtenidos para la primer rejilla de acoplamiento son: para la rejilla binaria un período de 1570 nm, una profundidad de grabado de 475 nm, y un ángulo de incidencia de 30° ; para la rejilla sinusoidal un período de 1705 nm, una profundidad de grabado de 530 nm, y un ángulo de incidencia de 31° .

La eficiencia de acoplamiento de la primer rejilla se determinó con la ec. 9, es decir, con la razón entre la potencia de entrada en la rejilla, y la potencia en la guía de onda. La potencia de entrada, se calcula con la potencia en el corte transversal del haz Gaussiano que proviene de la fibra óptica, Fig.19,

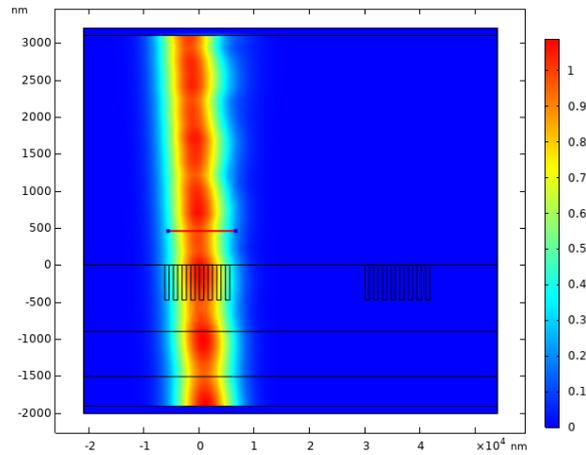


Figura 19: Simulación del haz Gaussiano con ángulo de incidencia $\theta= 30^0$ y línea donde se calculó el flujo de la potencia del haz incidente.

La gráfica del flujo de potencia del haz Gaussiano, mostrada en la Fig. 20, se integra para obtener la potencia de entrada.

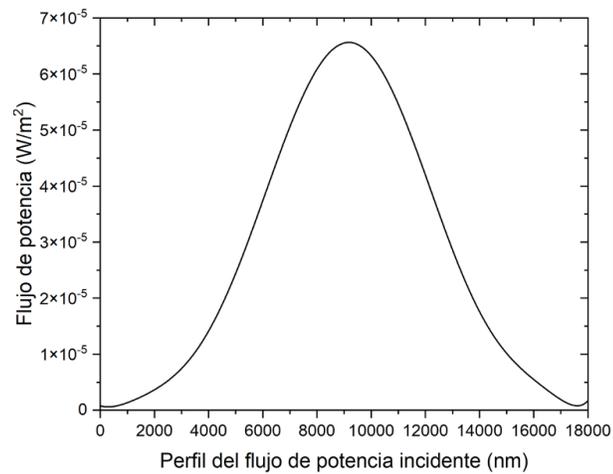


Figura 20: Perfil del flujo de potencia incidente.

La potencia en la guía de onda, se calculó en la posición de corte transversal de la guía, mostrada en la Fig. 21 (línea roja izquierda). El flujo de potencia que se propaga a través del corte de la guía para la rejilla binaria y sinusoidal se encuentra en la Fig. 22, cuya distribución de campo se muestra en la Fig. 26.

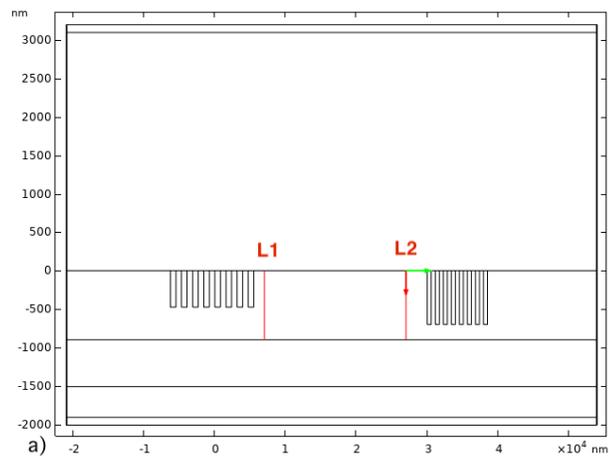


Figura 21: Cortes transversales en la guía de onda, donde se calcula el flujo de potencia (L1 y L2).

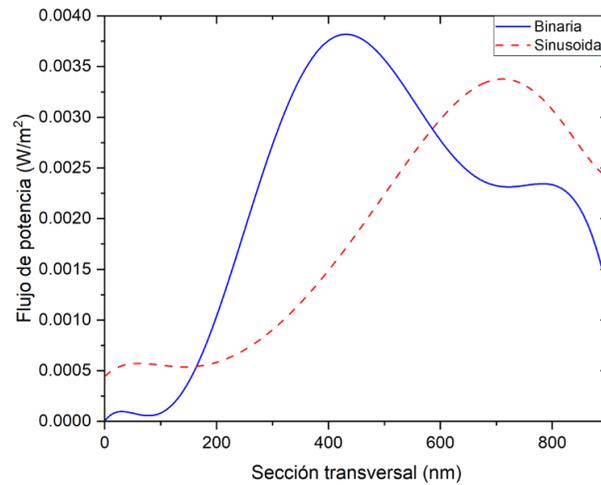


Figura 22: Perfiles de potencia a través de la línea L1 en la guía de onda.

Integrando las gráficas de potencia, se calcula una eficiencia de acoplamiento, con respecto a la potencia de entrada y la potencia en la guía. La eficiencia de la primer rejilla binaria es de 25 % y de la primer rejilla sinusoidal es de 16 %.

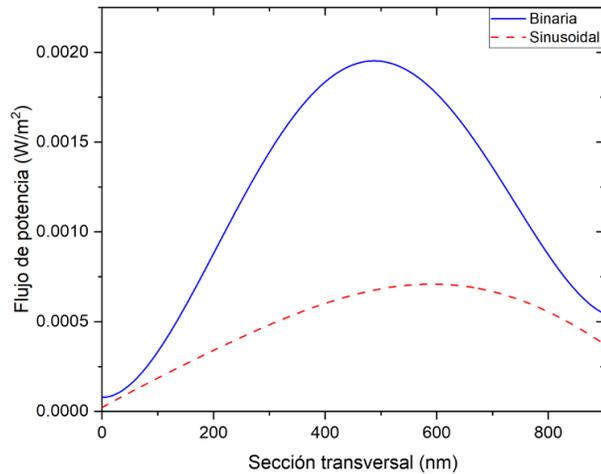


Figura 23: Perfiles de potencia a través de la línea L2 en la guía de onda.

La eficiencia de la segunda rejilla, se determinó variando sólo dos parámetros físicos, el período y la profundidad de grabado de la rejilla, con respecto al campo eléctrico en el punto P3, Fig. 10.

La Fig. 24 presenta la amplitud del campo eléctrico a la salida de la rejilla de desacoplamiento en función de la variación del período de la rejilla, presentando valores óptimos para períodos de $\Lambda = 1135$ nm y $\Lambda = 1190$ nm para las rejillas binaria y sinusoidal, respectivamente.

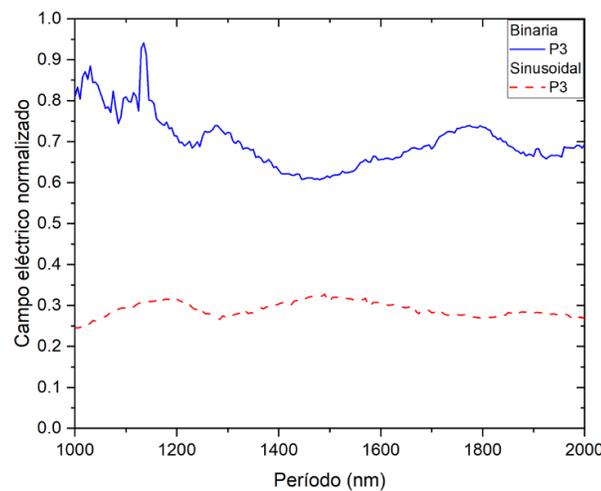


Figura 24: Campo eléctrico normalizado vs. período de desacoplamiento, $\Lambda = 1135$ nm y $\Lambda = 1190$ nm, para rejilla binaria y sinusoidal, respectivamente.

La profundidad de grabado es de 475 nm y 600 nm, de acuerdo a la Fig. 25, para la rejilla binaria y sinusoidal respectivamente.

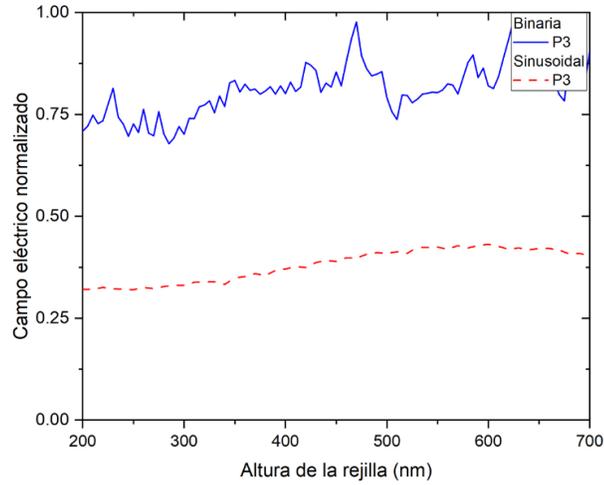


Figura 25: Campo eléctrico normalizado vs. profundidad de grabado, $h= 475$ nm y $h= 600$ nm, para rejilla binaria y sinusoidal, respectivamente.

La eficiencia de la segunda rejilla η_d se obtuvo de la razón del flujo de potencia en la guía de onda P_{WG} , con respecto al flujo de potencia de salida de la segunda rejilla P_O , ec. 10. El flujo de potencia a través de la guía (línea L2 Fig. 21), se muestra en la Fig. 23 y el flujo potencia del haz desacoplado de la rejilla de desacoplamiento se observa en la Fig. 27, cuyo posición de análisis L3 se muestra en la Fig. 26. El flujo de potencia del haz desacoplado que se muestra en la Fig. 27, presenta un máximo en el extremo izquierdo, cuyo comportamiento es el esperado en una rejilla de desacoplamiento según la literatura Marchetti et al. (2016); Nambiar et al. (2018).

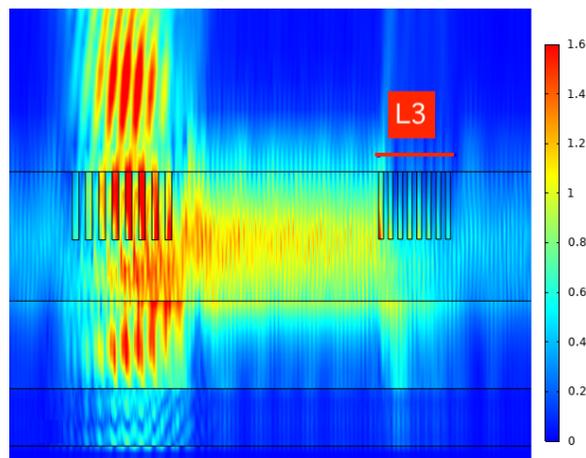


Figura 26: La línea L3, posición donde se calcula el flujo de potencia saliente de la segunda rejilla.

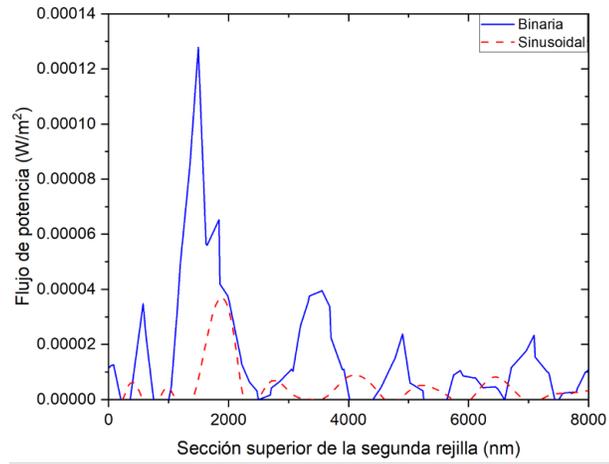


Figura 27: Flujo de potencia de desacoplamiento.

La eficiencia de la segunda rejilla es de 25 % y 22 %, para la rejilla binaria y sinusoidal, respectivamente.

En la Fig. 28 y Fig. 29, se muestran las simulaciones con los parámetros óptimos de acoplamiento para el caso de cada rejilla de acoplamiento.

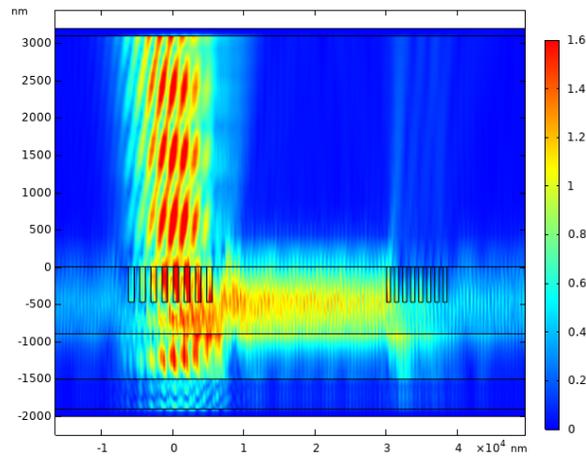


Figura 28: Distribución de intensidad del interconector óptico con rejillas binarias de acoplamiento de entrada y salida, con los parámetros físicos óptimos, a $\lambda = 1550$ nm.

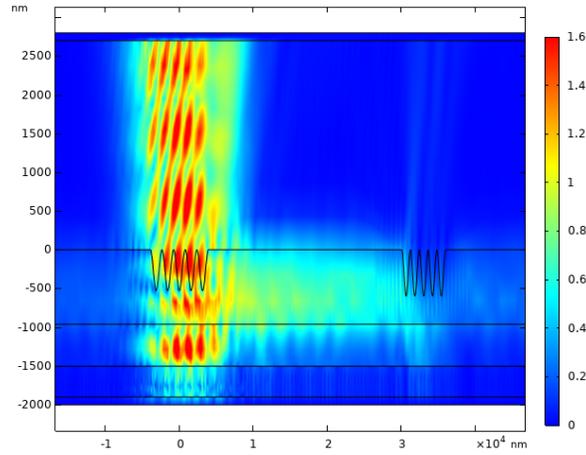


Figura 29: Distribución de intensidad del interconector óptico con rejillas sinusoidales de acoplamiento de entrada y salida, con los parámetros físicos óptimos, a $\lambda = 1550$ nm.

4.2. Análisis de eficiencia a $\lambda = 633$ nm.

Para analizar las dos rejillas de acoplamiento y desacoplamiento, binaria y sinusoidal, se realizó un procedimiento similar que el anterior. De la Fig. 30 se determinó el período para un ángulo de 30° , $\Lambda = 615$ nm.

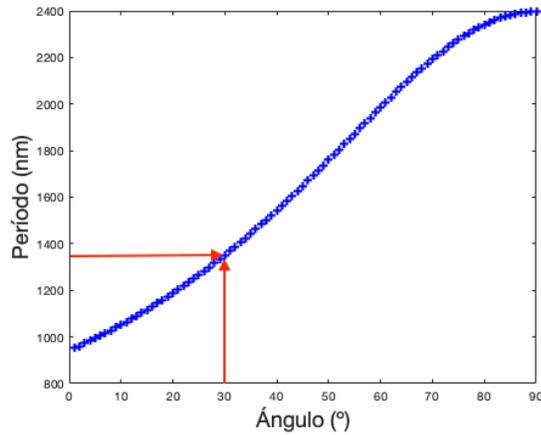


Figura 30: Variación del período con respecto al ángulo de incidencia para una guía de onda de $H = 350$ nm, a $\lambda = 633$ nm. El ángulo $\theta = 30^\circ$ corresponde a un período de $\Lambda = 615$ nm.

Los parámetros iniciales de diseño de la rejilla de acoplamiento, para una longitud de onda de operación de $\lambda = 633$ nm, se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros iniciales de la rejilla de acoplamiento para una $\lambda = 633$ nm.

Parámetros	Valor Inicial
Longitud de onda λ (μ m)	0.633
Índice de refracción Al_2O_3 (n_2)	1.64
Índice de refracción SiO_2 (n_3)	1.457
Índice de refracción Si (n_4)	3.8736
Espesor de la guía H (nm)	350

En la Fig. 31 se presentan resultados de la evolución de la amplitud del campo eléctrico de la luz que se acopla a la guía de onda en el punto P1 y su amplitud al alcanzar el punto P2, después de haberse propagado en la guía de onda.

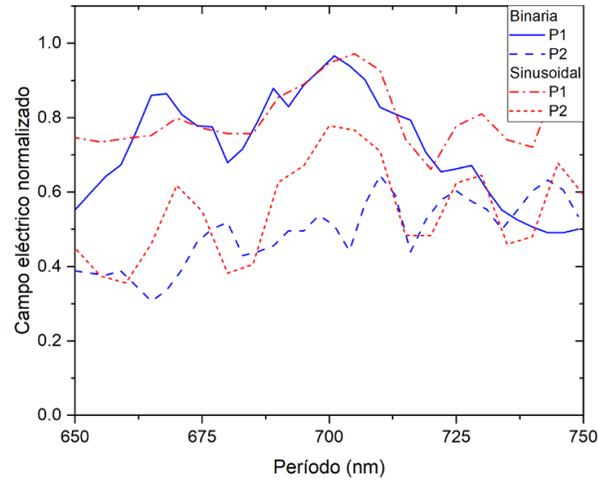


Figura 31: Campo eléctrico normalizado vs. período de acoplamiento, para $\Lambda = 705$ nm para ambas rejillas binaria y sinusoidal.

El campo eléctrico máximo se encuentra a un período de $\Lambda = 705$ nm, tanto para para la rejilla binaria, como para la rejilla sinusoidal.

Al analizar el efecto de la profundidad de grabado de la rejilla de acoplamiento Fig. 32, se observa que la profundidad óptima para una rejilla binaria y sinusoidal, es de $h = 140$ nm para ambas.

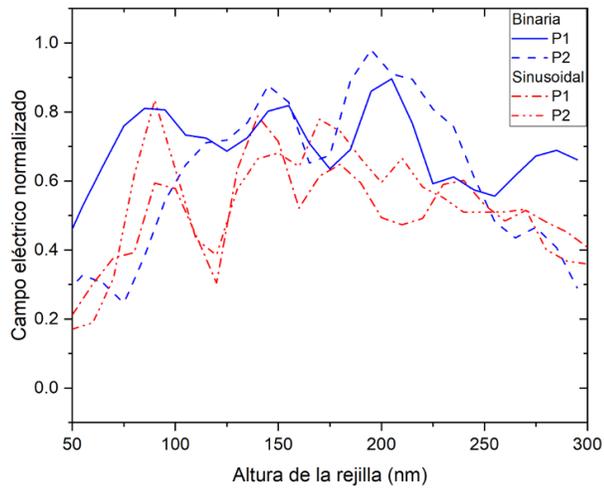


Figura 32: Campo eléctrico normalizado vs. profundidad de grabado, con $h= 140$ nm para ambas rejillas binaria y sinusoidal.

En la Fig. 33, se muestra el efecto de variar el ángulo de incidencia del haz de luz que se acopla a la rejilla de difracción de entrada. De donde se puede apreciar que los valores máximos de la amplitud del campo eléctrico acoplados son de $\theta = 30^\circ$ para una rejilla binaria y $\theta = 33,5^\circ$ para una rejilla sinusoidal.

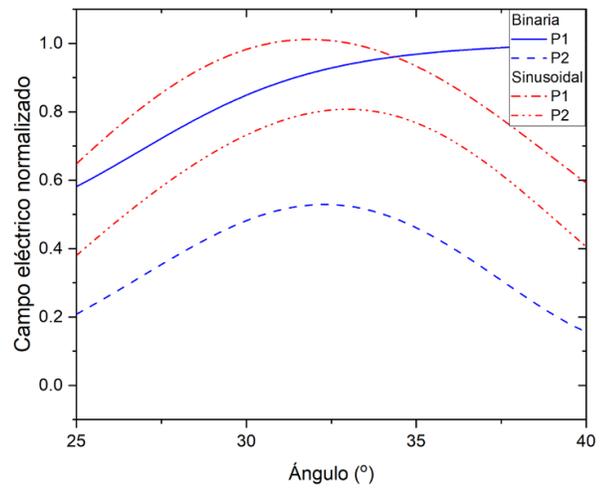


Figura 33: Campo eléctrico normalizado vs. ángulo de incidencia, con $\theta= 30^\circ$ y $\theta= 33,5^\circ$, para la rejilla binaria y sinusoidal, respectivamente

Los parámetros óptimos obtenidos son: para la rejilla binaria un período de 705 nm, una profundidad de grabado de 140 nm, y un ángulo de incidencia de 30° ; para la rejilla sinusoidal un período de 705 nm, una profundidad de grabado de 140 nm, y un ángulo de incidencia de $33,5^\circ$.

Del flujo de potencia en la guía Fig. 34, calculada en el corte transversal de la guía (línea roja izquierda Fig. 21), cuya distribución de campo se puede ver en la Fig. 33, la eficiencia de acoplamiento es de 7% y 8%, para la rejilla binaria y la sinusoidal respectivamente.

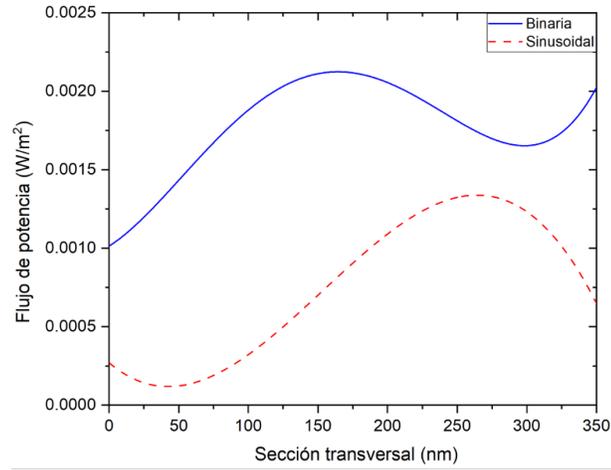


Figura 34: Perfiles de potencia a través de la línea L1 en la guía de onda.

El cálculo de la eficiencia de desacoplamiento de la segunda rejilla, se realizó con un procedimiento similar al anterior.

El período óptimo de desacoplamiento obtenido a partir de la Fig. 35, es de 590 nm y 450 nm, para la segunda rejilla binaria y sinusoidal, respectivamente.

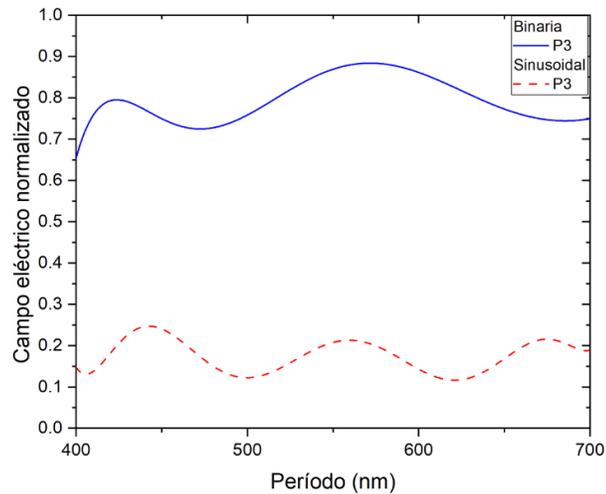


Figura 35: Campo eléctrico normalizado vs. período de desacoplamiento, con $\Lambda = 590 \text{ nm}$ y $\Lambda = 450 \text{ nm}$, para la rejilla binaria y la rejilla sinusoidal, respectivamente.

La profundidad de grabado óptima, Fig. 36, es de 140 nm para ambas rejillas de desacoplamiento, calculados en el punto P3, Fig. 10

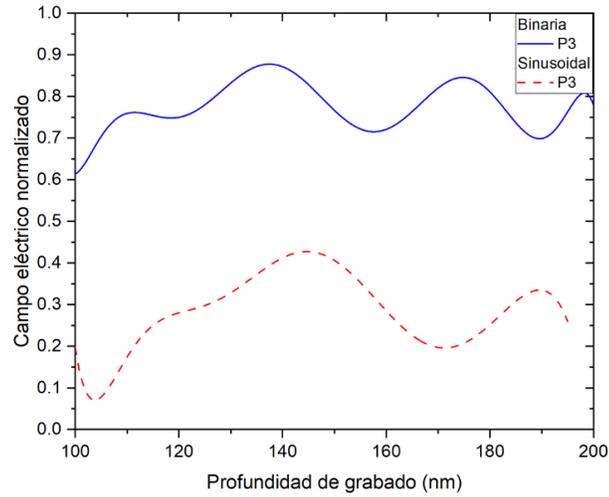


Figura 36: Campo eléctrico normalizado vs. profundidad de grabado, con $h=140$ nm para ambas rejillas.

La eficiencia de desacoplamiento de la segunda rejilla, se determinó a partir del flujo de potencia en la guía (línea derecha Fig. 21), cuyo perfil se muestra en la Fig. 37 para ambas rejillas, y el flujo de potencia arriba de la segunda rejilla, Fig. 38.

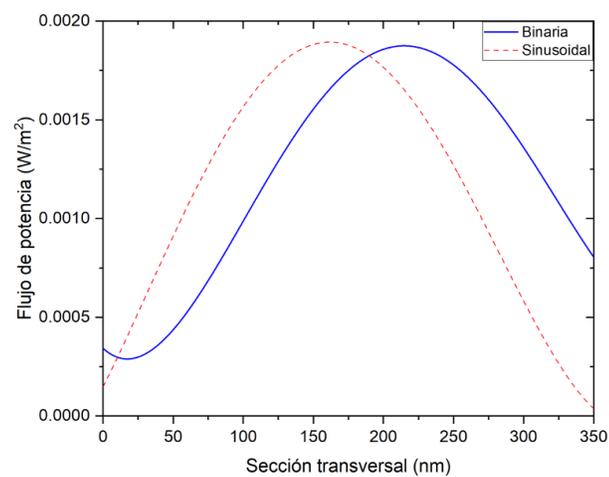


Figura 37: Perfiles de potencia a través de la línea L2 en la guía de onda.

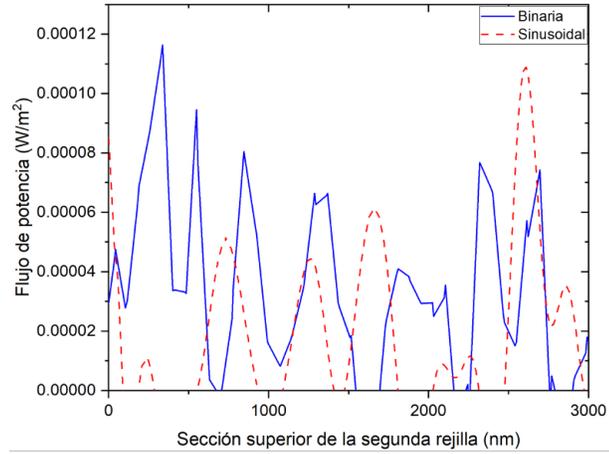


Figura 38: Flujo de potencia de la rejilla de desacoplamiento.

La eficiencia de desacoplamiento de la segunda rejilla es de 53% y 34%, para la rejilla binaria y sinusoidal, respectivamente.

La simulación del sistema óptico con los parámetros óptimos de acoplamiento y desacoplamiento, para la rejilla binaria se muestra en la Fig. 39 y la rejilla sinusoidal Fig. 40.

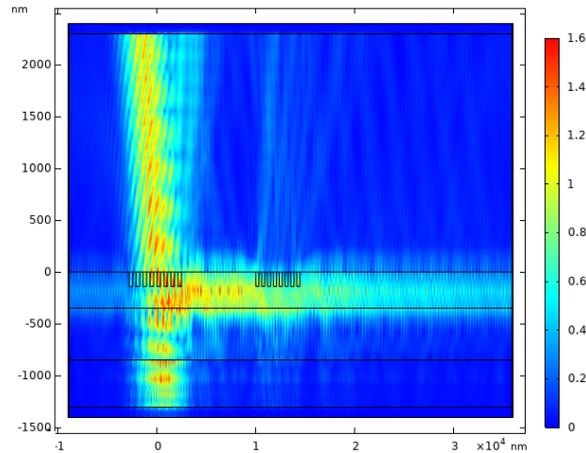


Figura 39: Distribución de intensidad del interconector óptico con rejillas binarias de acoplamiento de entrada y salida, con los parámetros físicos óptimos, a $\lambda = 633$ nm.

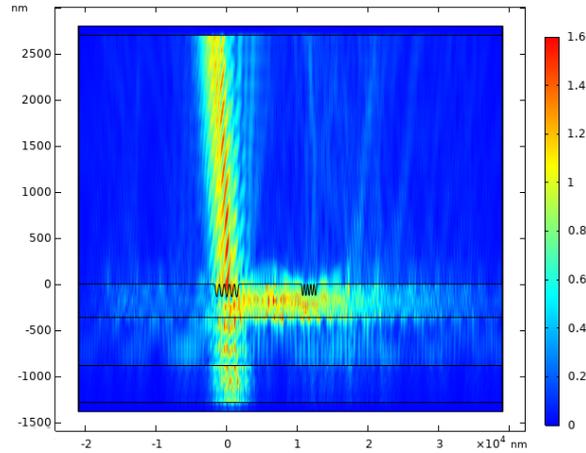


Figura 40: Distribución de intensidad del interconector óptico con rejillas sinusoidales de acoplamiento de entrada y salida, con los parámetros físicos óptimos, a $\lambda = 633$ nm.

Por último, la eficiencia total del dispositivo optoelectrónico es: a una longitud de onda de 1550 nm, la eficiencia es de 3% y 1%, para la configuración binaria y sinusoidal, respectivamente. Mientras que para una longitud de onda de 633 nm, la eficiencia es de 2.3% y 1.5%, para la configuración binaria y sinusoidal, respectivamente.

Existe un reto tecnológico, que debe ser tomado en consideración, entre los parámetros de diseño de las rejillas de acoplamiento, su eficiencia y el ángulo de acoplamiento con las dimensiones típicas de componentes a reproducir por un proceso de fabricación de litografía óptica, litografía laser y litografía de rayos X.

La eficiencia de las rejillas de acoplamiento lograda para ambas longitudes de onda es adecuada y muy superior a la típica eficiencia que se puede tener con un acoplamiento directo fibra óptica a guía de onda debido a la discrepancia de tamaños de los núcleos de ambas componentes. El diseño de las rejillas de acoplamiento presentado en este trabajo está orientado al acoplamiento de rejilla de entrada fibra a guía de onda y el desacoplamiento de rejilla de la luz de guía de onda a una fibra óptica.

Capítulo V

5. Conclusiones

En este trabajo se presenta el diseño de acopladores y desacopladores de rejilla de difracción tipo binaria y sinusoidal para guías de onda, usando el método de elemento finito.

Los resultados indican, que se puede obtener eficiencias de acoplamiento de 21 % y 15 %, y eficiencias de desacoplamiento de 25 % y 22 %, a una longitud de onda de 1550 nm, eficiencias de acoplamiento de 7 % y 8 %, y de desacoplamiento de 53 % y 34 %, para una longitud de onda de 633 nm, para rejillas binaria y sinusoidal, respectivamente. Los parámetros físicos óptimos de las rejillas de acoplamiento binaria y sinusoidal para una longitud de onda de 1550 nm son: período de acoplamiento de 1570 nm y 1705 nm, profundidad de grabado de 425 nm y 550 nm, ángulos de acoplamiento de 30° y 31° , de las rejillas de desacoplamiento son: período de 1135 nm y 1190 nm, profundidad de grabado de 475 nm y 600 nm, para una guía de espesor de 900 nm. Asimismo, para operación a una longitud de onda de 633 nm, los parámetros óptimos son: período de acoplamiento de 705 nm, profundidad de grabado de 140 nm, ángulos de acoplamiento de 30° y 33.5° , y los parámetros de desacoplamiento de la segunda rejilla son 590 nm y 450 nm, y profundidad de grabado de 140 nm para ambas rejillas, para una guía de onda de espesor de 350 nm. Los resultados encontrados indican la viabilidad de desarrollo de este tipo de componentes por técnicas de microlitografía óptica. Sin embargo, existe un reto tecnológico que consiste en tener en cuenta los parámetros de diseño de las rejillas de acoplamiento, su eficiencia y el ángulo de acoplamiento con las dimensiones típicas de los componentes a reproducir mediante un proceso de fabricación por litografía óptica, litografía láser y litografía de rayos X, entre otros.

Referencias

- A. Agrawal and B. Rahman. *Finite element modeling methods for photonics*. Artech House, 2013.
- C. Alonso-Ramos, A. Ortega-Monux, I. Molina-Fernandez, P. Cheben, L. Zavargo-Peche, R. Halir, N. Kim, S. Janz, and D. Xu. Design of an optimized grating coupler for thick soi rib waveguides. 2011a. doi: 10.1109/ICO-IP.2011.5953789.
- C. Alonso-Ramos, A. Ortega-Moñux, L. Zavargo-Peche, R. Halir, J. de Oliva-Rubio, I. Molina-Fernández, P. Cheben, D. Xu, S. Janz, and N. Kim. Efficient fibre-chip grating coupler for thick soi rib waveguides. 2011b.
- C. Alonso-Ramos, A. Ortega-Moñux, L. Zavargo-Peche, R. Halir, J. de Oliva-Rubio, I. Molina-Fernández, P. Cheben, D.-X. Xu, S. Janz, and N. Kim. Efficient fibre-chip grating coupler for thick soi rib waveguides. 2011c.
- A. Atabaki, S. Moazeni, F. Pavanello, H. Gevorgyan, J. Notaros, L. Alloatti, M. Wade, C. Sun, S. Kruger, H. Meng, K. Al Qubaisi, I. Wang, B. Zhang, A. Khilo, C. Baiocco, M. Popovic, V. Stojanovic, and R. Ram. Integrating photonics with silicon nanoelectronics for the next generation of systems on a chip. *Nature*, 556(7701):349–353, 2018. doi: 10.1038/s41586-018-0028-z.
- M. Baghban, J. Schollhammer, C. Errando-Herranz, K. Gylfason, and K. Gallo. Waveguide gratings in thin-film lithium niobate on insulator. volume Part F82-CLEO_{Europe}2017, 2017.
- N. Bamiedakis, K. Williams, R. Penty, and I. White. *Optical Fiber Telecommunications VIA: Chapter 11. Integrated and Hybrid Photonics for High-Performance Interconnects*. Optics and Photonics. Elsevier Science, 2013. ISBN 9780128060650.
- D. Benedikovic, P. Cheben, J. Schmid, D.-X. Xu, S. Wang, S. Janz, R. Halir, A. Ortega-Moñux, and M. Dado. High-efficiency subwavelength-engineered surface grating couplers in soi and dsoi. pages 41–42, 2014. doi: 10.1109/Group4.2014.6962018.
- D. J. Blumenthal. Photonic integration for uv to ir applications. *APL Photonics*, 5(2):020903, 2020. doi: 10.1063/1.5131683.

- C. Chang, Y. Hsu, H. Kuo, and Y. Lai. Subwavelength apodized grating coupler for silicon photonics waveguide coupling. 2020. doi: 10.1109/OECC48412.2020.9273715.
- X. Chen, C. Li, C. Fung, S. Lo, and H. Tsang. Apodized waveguide grating couplers for efficient coupling to optical fibers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 22(15):1156–1158, 2010. doi: 10.1109/LPT.2010.2051220.
- X. Chen, Z. Cheng, C. K. Y. Fung, and H. K. Tsang. Design and applications of silicon waveguide grating couplers. In J. Kubby and G. T. Reed, editors, *Silicon Photonics VII*, volume 8266, pages 77 – 86. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2012. doi: 10.1117/12.907947. URL <https://doi.org/10.1117/12.907947>.
- Z. Cheng, X. Chen, C. Wong, K. Xu, C. Fung, Y. Chen, and H. Tsang. Mid-infrared grating couplers for silicon-on-sapphire waveguides. *IEEE Photonics Journal*, 4(1):104–113, 2012. doi: 10.1109/JPHOT.2011.2179921.
- J. Chovan, N. Kuzma, F. Uherek, and D. Seyringer. Design and simulation of apodized soi fibre-to-chip coupler by sub-wavelength structure. volume 8915, 2013. doi: 10.1117/12.2036067.
- M. Diez, V. Raimbault, S. Joly, L. Oyhenart, J. Doucet, I. Obieta, C. Dejours, and L. Bechou. Direct patterning of polymer optical periodic nanostructures on cytop for visible light waveguiding. *Optical Materials*, 82:21–29, 2018. doi: 10.1016/j.optmat.2018.05.035.
- S. Gali, V. Raghunathan, and S. Selvaraja. Visible wavelength photonic integrated circuit in silicon nitride platform for on-chip sensing applications. 2019. doi: 10.1109/WRAP47485.2019.9013702.
- T. E. Gartmann and F. Kehl. Experimental validation of the sensitivity of waveguide grating based refractometric (bio)sensors. *Biosensors*, 5(2):187–198, 2015. ISSN 2079-6374. doi: 10.3390/bios5020187. URL <https://www.mdpi.com/2079-6374/5/2/187>.
- R. Halir, A. Ortega-Moñux, J. Schmid, C. Alonso-Ramos, J. Lapointe, D.-X. Xu, J. Wangüemert-Pérez, Í. Molina-Fernández, and S. Janz. Recent advances in silicon waveguide devices using sub-wavelength gratings. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 20(4), 2014. doi: 10.1109/JSTQE.2013.2293754.

- R. Halir, A. Herrero-Bermello, J. Luque-Gonzalez, A. Ortega-Monux, G. Wanguemert-Perez, A. Velasco, J. Schmid, P. Cheben, and I. Molina-Fernandez. Designing anisotropy with waveguide subwavelength structures. volume 2018-July, 2018. doi: 10.1109/ICTON.2018.8473841.
- K. R. Harper. *Theory, Design, and Fabrication of Diffractive Grating Coupler for Slab Waveguide*. PhD thesis, Brigham Young University, 2003.
- N. Hattasan, B. Kuyken, F. Leo, E. Ryckeboer, D. Vermeulen, and G. Roelkens. High-efficiency soi fiber-to-chip grating couplers and low-loss waveguides for the short-wave infrared. *IEEE Photonics Technology Letters*, 24(17):1536–1538, 2012. doi: 10.1109/LPT.2012.2208452.
- P. I. Kattan. *MATLAB Guide to Finite Elements*. Springer Berlin, Heidelberg, 1 edition, 2003.
- R. Larrea-Luzuriaga, A. Gutierrez, and P. Sanchis. Analytical strategy to achieve optimized grating couplers with high precision for both te and tm polarizations on soi platform. 2016. doi: 10.1109/ETCM.2016.7750855.
- Q. Liu, X. Tu, K. W. Kim, J. S. Kee, Y. Shin, K. Han, Y.-J. Yoon, G.-Q. Lo, and M. K. Park. Highly sensitive mach–zehnder interferometer biosensor based on silicon nitride slot waveguide. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 188:681–688, 2013. ISSN 0925-4005. doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.07.053>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400513008502>.
- R. Marchetti, C. Lacava, L. Carroll, K. Gradkowski, and P. Minzioni. Coupling strategies for silicon photonics integrated chips. *Photon. Res.*, 7:201–239, 2016.
- T. Mogami, T. Horikawa, K. Kinoshita, Y. Hagihara, J. Ushida, M. Tokushima, J. Fujikata, S. Takahashi, T. Shimizu, A. Ukita, K. Takemura, M. Kurihara, K. Yashiki, D. Okamoto, Y. Suzuki, Y. Sobu, S.-H. Jeong, Y. Tanaka, T. Nakamura, and K. Kurata. 1.2 tbps/cm² enabling silicon photonics ic technology based on 40-nm generation platform. *Journal of Lightwave Technology*, 36(20):4701–4712, 2018. doi: 10.1109/JLT.2018.2863779.
- S. Nambiar, P. Sethi, and S. K. Selvaraja. Grating-assisted fiber to chip coupling for soi photonic circuits. *Applied Sciences*, 8(7), 2018. ISSN 2076-3417. doi: 10.3390/app8071142.
- M. Nedeljkovic, J. Penadés, C. Mitchell, A. Khokhar, S. Stanković, T. Bucio, C. Littlejohns, F. Gardes, and G. Mashanovich. Surface-grating-coupled low-loss ge-on-si rib waveguides and

- multimode interferometers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 27(10):1040–1043, 2015. doi: 10.1109/LPT.2015.2405611.
- K. Ptasinski, S. Lis, M. Wielichowski, and S. Patela. Modeling and optimization of grating coupler for slab waveguide. pages 66–68, 2010. doi: 10.1109/STYSW.2010.5714171.
- J. H. Schmid, P. Cheben, J. Lapointe, D.-X. Xu, S. Janz, M. Vachon, S. Wang, P. Bock, D. Benedikovič, R. Halir, A. Ortega-Moñux, C. A. Ramos, J. G. W. Pérez, and I. Molina-Fernández. Silicon photonic integration with subwavelength gratings. In *2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pages 1–2, 2014. doi: 10.1109/ICTON.2014.6876506.
- D. Taillaert, F. V. Laere, M. Ayre, W. Bogaerts, D. V. Thourhout, P. Bienstman, and R. Baets. Grating couplers for coupling between optical fibers and nanophotonic waveguides. *Japanese Journal of Applied Physics*, 45(8A):6071–6077, aug 2006. doi: 10.1143/jjap.45.6071.
- Y. Tang, D. Dai, and S. He. Proposal for a grating waveguide serving as both a polarization splitter and an efficient coupler for silicon-on-insulator nanophotonic circuits. *IEEE Photonics Technology Letters*, 21(4):242–244, 2009. doi: 10.1109/LPT.2008.2010528.
- M. Velasco-Garcia. Optical biosensors for probing at the cellular level: A review of recent progress and future prospects. *Seminars in Cell and Developmental Biology*, 20(1):27–33, 2009. doi: 10.1016/j.semcdb.2009.01.013.
- Y. Wang, H. Yun, Z. Lu, R. Bojko, W. Shi, X. Wang, J. Flueckiger, F. Zhang, M. Caverley, N. Jaeger, and L. Chrostowski. Apodized focusing fully etched subwavelength grating couplers. *IEEE Photonics Journal*, 7(3), 2015. doi: 10.1109/JPHOT.2015.2426879.
- Z. Wang, Y. Tang, N. Zhu, L. Wosinski, D. Dai, U. Westergren, and S. He. Experimental demonstration of an ultracompact polarization beam splitter based on a bidirectional grating coupler. 2009.
- P. Wen, P. Tiwari, S. Mauthe, H. Schmid, M. Sousa, M. Scherrer, M. Baumann, B. Bitachon, J. Leuthold, B. Gotsmann, and K. Moselund. Waveguide coupled iii-v photodiodes monolithically integrated on si. *Nature Communications*, 13(1), 2022. doi: 10.1038/s41467-022-28502-6.

- H. Xu, Y. Hu, Y. Zhu, Y. Li, Z. Li, Z. Fan, Y. Yu, and J. Yu. Hybrid-integrated silicon photonic circuit with an ingaas photodetector. pages 126–128, 2010. doi: 10.1109/GROUP4.2010.5643404.
- J. Xu, D. Suarez, and D. S. Gottfried. Detection of avian influenza virus using an interferometric biosensor. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 389(4):1193–1199, 2007. doi: 10.1007/s00216-007-1525-3.
- Y. Xu, F. Wang, Y. Gao, W. Chen, C. Chen, X. Wang, Y. Yi, X. Sun, and D. Zhang. Efficient polymer waveguide grating coupler with directionality enhancement. *Optics Communications*, 463, 2020. doi: 10.1016/j.optcom.2020.125418.
- J. Zhang, J. Yang, W. Wu, H. Jia, and S. Chang. High performance silicon-on-sapphire sub-wavelength grating coupler for 2.7 micro m wavelength. volume 1, pages 73–77, 2015. doi: 10.5220/0005333700730077.
- Z. Zhang, X. Shan, B. Huang, Z. Zhang, C. Cheng, B. Bai, T. Gao, X. Xu, L. Zhang, and H. Chen. Efficiency enhanced grating coupler for perfectly vertical fiber-to-chip coupling. *Materials*, 13(12), 2020. ISSN 1996-1944. doi: 10.3390/ma13122681.

Apéndice A. Publicaciones derivadas de este trabajo de tesis.

Publicación (JCR)

Góngora-Lugo, P., García-Guerrero, E. E., Inzunza-González, E., Chaikina, E. I., Márquez Becerra, H. (2022). **Design of grating couplers for submicron optical waveguides.** Revista Mecicana de Física, (Ref. 6571) -10 Agosto de 2022-