

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR DE GANDIA
Grado en Ing. Sist. de Telecom., Sonido e Imagen



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

**Diseño de elementos de acoplo vertical
para la interrogación de chips fotónicos
en el régimen visible**

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autor/a:
Miguel Ángel Devesa Ferrer

Tutor/a:
Jaime García Rupérez

GANDIA, 2021

Resumen

Uno de los elementos esenciales a la hora de desarrollar chips fotónicos son los elementos de acoplo, que nos permiten acoplar la luz desde/hacia el exterior (e.g., un láser, una fibra, un fotodetector). Una de las principales soluciones consideradas para esto es el uso de *grating couplers*, redes periódicas superficiales que nos permiten redirigir en la dirección vertical (o con un determinado ángulo de inclinación) la luz guiada en el chip (o viceversa).

Normalmente, se diseñan para trabajar en el rango infrarrojo del espectro, en 2ª y 3ª ventana de transmisión, ya que suelen estar pensados para implementar funcionalidades en esas redes de comunicación. No obstante, otras aplicaciones como los biosensores fotónicos en los que se utiliza la luz guiada en el chip para la detección de sustancias biológicas es más conveniente trabajar en el rango visible del espectro, ya que evitará el uso de equipos de medida bastante más costosos como aquellos pensados para trabajar en el infrarrojo. De esta forma, en este Trabajo Final de Grado se diseñan *grating couplers* que trabajan en el visible para estructuras de nitruro de silicio, considerando tanto configuraciones *full-etch* como *shallow-etch*.

Resum

Un dels elements essencials a l'hora de desenvolupar xips fotònics són els elements d'acoblament, que ens permeten acoblar la llum des/cap a l'exterior (e.g., un làser, una fibra, un fotodetector). Una de les principals solucions considerades per això és l'ús de *grating couplers*, xarxes periòdiques superficials que ens permeten redirigir a la direcció vertical (o amb un determinat angle d'inclinació) la llum guiada al xip (o viceversa).

Normalment, es dissenyen per treballar en el rang infraroig de l'espectre, en 2ª i 3ª finestra de transmissió, ja que solen estar pensats per implementar funcionalitats en aquestes xarxes de comunicació. No obstant, altres aplicacions com els biosensors fotònics en què s'utilitza la llum guiada al xip per a la detecció de substàncies biològiques és més convenient treballar en el rang visible de l'espectre, ja que evitarà l'ús d'equips de mesura molt més cars com aquells pensats per a treballar en l'infraroig. D'aquesta manera, en aquest Treball Final de Grau es dissenyen *grating couplers* que treballen en el visible per a estructures de nitrur de silici, considerant tant configuracions *full-etch* com *shallow-etch*.

Abstract

One of the essential elements when developing photonic chips are coupling elements, which allow us to couple light from / to the outside (e.g., a laser, a fiber, a photodetector). One of the main solutions considered for this is the use of grating couplers, periodic surface networks that allow us to redirect in the vertical direction (or with a certain angle of inclination) the light guided on the chip (or vice versa).

Normally, they are designed to work in the infrared range of the spectrum, in the 2nd and 3rd transmission window, since they are usually designed to implement functionalities in these communication networks. However, other applications such as photonic biosensors in which guided light is used on the chip for the detection of biological substances, it is more convenient to work in the visible range of the spectrum, since it will avoid the use of much more expensive measurement equipment such as those designed to work in the infrared. In this way, this Final Degree Project grating couplers that work in the visible are designed for silicon nitride structures, considering both full-etch and shallow-etch configurations.

Índice de contenido

1.	Introducción	8
1.1.	La fotónica integrada y el problema del acoplo de luz	8
1.2.	Objetivos del trabajo	10
1.3.	Metodología	11
1.4.	Etapas	11
1.5.	Problemas.....	12
2.	Estudio, diseño y análisis del <i>grating coupler</i>	13
2.1.	Teoría y fundamentos del <i>grating coupler</i>	13
2.1.1.	Silicio sobre aislante (SOI)	13
2.1.2.	Acoplamiento óptico. Efecto Fabry-Perot.....	13
2.1.3.	Técnicas de acoplo. <i>Grating coupler</i>	14
2.1.4.	Ley de difracción de Bragg	17
2.1.5.	Eficiencia de acoplo	17
2.1.6.	Ancho de banda.....	18
3.	Diseño y optimización del <i>grating coupler</i> en el régimen visible	19
3.1.	Diseño full-etched.....	25
3.2.	Diseño shallow-etch.....	38
3.3.	Fabricación y medición del <i>full-etch grating coupler</i>	43
3.3.1.	Fabricación del acoplador óptico	43
3.3.2.	Medición del chip fotónico	46
4.	Conclusiones	48
5.	Bibliografía	49

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Implementación de biosensores	8
Ilustración 2. Lab-On-Chip.....	9
Ilustración 3. Núcleo de una fibra monomodo y guía óptica integrada.....	10
Ilustración 4. Técnicas de acoplo horizontal y vertical.....	10
Ilustración 5. Sustrato SOI original y con guía de onda	13
Ilustración 6. Efecto Fabry-Perot.....	14
Ilustración 7. Edge-coupling con inverted taper	14
Ilustración 8. Acoplo mediante grating coupler.....	15
Ilustración 9. Shallow-etched y full-etched	15
Ilustración 10. Esquema de un grating coupler.....	16
Ilustración 11. Ventana de inicio de FullWAVE	20
Ilustración 12. Editor de materiales de FullWAVE	20
Ilustración 13. Editor de la tabla de símbolos de FullWAVE.....	21
Ilustración 14. Propiedades del segmento en FullWAVE	22
Ilustración 15. Celda unitaria en FullWAVE.....	22
Ilustración 16. Esquemático y propiedades del array dinámico del grating	23
Ilustración 17. Parámetros del campo radiado y su camino en FullWAVE	23
Ilustración 18. Esquemático con los monitores en FullWAVE	24
Ilustración 19. Mapa de contorno del perfil de índice en FullWAVE	24
Ilustración 20. Campos electromagnéticos radiados en FullWAVE	25
Ilustración 21. Barrido del ancho de la capa de óxido con FullWAVE.....	26
Ilustración 22. Barrido de la longitud de onda en FullWAVE	26
Ilustración 23. Barrido del factor de forma y el periodo a 600 nm en FullWAVE	26
Ilustración 24. Barrido del factor de forma y el periodo a 615 nm en FullWAVE	27
Ilustración 25. Barrido del factor de forma en función del periodo a 630 nm en FullWAVE	27

Ilustración 26. Barrido del factor de forma y el periodo a 650 nm en FullWAVE	27
Ilustración 27. Barrido del factor de forma y el periodo a 690 nm en FullWAVE	28
Ilustración 28. Barrido del factor de forma y el periodo a 710 nm en FullWAVE	28
Ilustración 29. Barrido del factor de forma y el periodo a 730 nm en FullWAVE	28
Ilustración 30. Valores del monitor a 615 nm en FullWAVE	29
Ilustración 31. Barrido del periodo y la longitud de onda en FullWAVE	30
Ilustración 32. Resultado del monitor a 616 nm en FullWAVE.....	30
Ilustración 33. Barrido de la longitud de onda y el periodo para 34° en FullWAVE	31
Ilustración 34. Barrido del factor de forma y el periodo para 34° en FullWAVE	31
Ilustración 35. Barrido del factor de forma y el periodo a 550 nm en FullWAVE	32
Ilustración 36. Barrido del factor de forma y el periodo a 565 nm en FullWAVE	32
Ilustración 37. Barrido del factor de forma y el periodo a 590 nm en FullWAVE	32
Ilustración 38. Barrido del factor de forma y el periodo a 650 nm en FullWAVE	33
Ilustración 39. Barrido del factor de forma y el periodo a 680 nm en FullWAVE	33
Ilustración 40. Barrido del factor de forma y el periodo a 710 nm en FullWAVE	33
Ilustración 41. Barrido del factor de forma y el periodo para 610 nm a 34° en FullWAVE ...	34
Ilustración 42. Resultado de los monitores para 610 nm a 34° en FullWAVE.....	35
Ilustración 43. Valor del monitor para 34° en FullWAVE	35
Ilustración 44. Barrido de la longitud de onda y el ángulo en FullWAVE.....	36
Ilustración 45. Barrido del periodo y el factor de forma para ángulo libre en FullWAVE	36
Ilustración 46. Barrido del ángulo y la longitud de onda para ángulo libre en FullWAVE	37
Ilustración 47. Barrido del periodo y el factor de forma a 650 nm en FullWAVE	37
Ilustración 48. Barrido de la longitud de onda y el ángulo en FullWAVE.....	38
Ilustración 49. Valor del monitor para ángulo libre en FullWAVE	38
Ilustración 50. Barrido de la longitud de onda en función de la profundidad de grabado en FullWAVE	39

Ilustración 51. Barrido del ángulo en función de la profundidad de grabado en FullWAVE .	39
Ilustración 52. Barrido del periodo en función de la profundidad de grabado en FullWAVE	39
Ilustración 53. Barrido del factor de forma en función de la profundidad de grabado en FullWAVE	40
Ilustración 54. Barrido del periodo y el factor de forma para el diseño shallow-etch en FullWAVE	40
Ilustración 55. Barrido de la longitud de onda y el factor de forma para el diseño shallow-etch en FullWAVE	41
Ilustración 56. Barrido de las variables Zmon y Offset para el diseño shallow-etch en FullWAVE	41
Ilustración 57. Barrido del ángulo y la profundidad de grabado para el diseño shallow-etch en FullWAVE	41
Ilustración 58. Barrido del número de periodos en FullWAVE	42
Ilustración 59. Sala limpia del NTC en la UPV	43
Ilustración 60. Diferencia en el proceso de fabricación del shallow-etch y el full-etch	44
Ilustración 61. Fotografía de la guía de ondas	44
Ilustración 62. Fotografía del grating coupler.....	45
Ilustración 63. Fotografía del grating coupler.....	45
Ilustración 64. Fotografía del grating coupler.....	45
Ilustración 65. Fotografía del grating coupler.....	46
Ilustración 66. Espectro de la fuente óptica	46

1. Introducción

1.1. La fotónica integrada y el problema del acoplo de luz

Gracias a los experimentos de grandes físicos al principio del siglo XX, la fotónica, análogamente a la electrónica, descubrió cómo la luz también está formada por partículas fundamentales llamadas fotones y cómo éstos pueden fluir en un haz o a través de materiales [1]. Así, nuestros dispositivos deben pasar de utilizar señales eléctricas a funcionar con luz, permitiendo que puedan funcionar miles de veces más rápido. En 1969, apareció por primera vez el término *óptica integrada*, refiriéndose a la implementación en un único sustrato de varios dispositivos fotónicos con una funcionalidad determinada.

Anteriormente, las tecnologías pioneras fueron las de bajo contraste, es decir, con una diferencia muy pequeña entre el índice de refracción del núcleo y la cubierta. Tras la aparición de las tecnologías de alto contraste, como las de fosforo de indio (InP) o de silicio sobre aislante (SOI), se alcanza una diferencia entre índices más alta y, por tanto, un guiado fuerte de la luz. Esta última tecnología presenta una alta capacidad y densidad de integración, posibilita radios de curvatura menores a 10 micras y es compatible con los procesos de fabricación CMOS (semiconductor complementario de óxido metálico, por sus siglas en inglés). Así, permite la producción a gran escala de componentes de bajo coste como han hecho importantes compañías a nivel mundial, como Intel o IBM.

Además de su uso en las comunicaciones ópticas guiadas, la óptica integrada se utiliza en otras aplicaciones muy interesantes. Por ejemplo, se emplea en la implementación de biosensores [2] que permiten detectar proteínas, ADN, sustancias tóxicas, etc., como se observa en la Ilustración 1. Utilizan el principio de detección del campo evanescente. Este mecanismo fija una capa bioreceptora que al entrar en contacto con el analito de interés interacciona con la luz y afecta las propiedades de propagación en la guía de onda, en concreto, variando el índice de refracción.

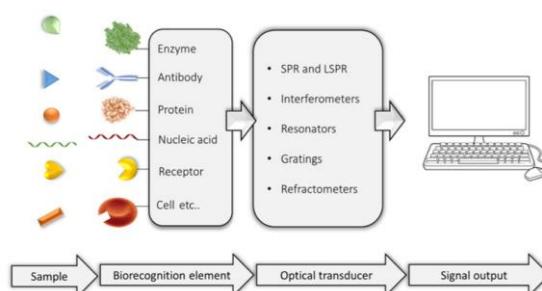


Ilustración 1. Implementación de biosensores

La investigación de estos ha crecido exponencialmente a lo largo de la última década. Las principales aplicaciones se presentan en los campos de la medicina, el medio ambiente y la biotecnología. Cada una tiene sus propios requerimientos en términos de concentración del analito y de la muestra a medir, precisión, tiempo de la prueba o higienización del sistema [3].

Las técnicas tradicionales para el control de variables ambientales y de la salud humana se basan en análisis bioquímicos que requieren de laboratorios especializados que conllevan a altos tiempos de respuesta y costos de procesamiento (Gavela et al. 2016). Además, estos métodos son poco efectivos para análisis en campo donde se necesita equipamiento portable, miniaturizado y de análisis rápido (Justino, Duarte, and Rocha-Santos, 2017).

Ante esta problemática, recientemente ha emergido una tecnología conocida como Lab-On-Chip (o LOC, por sus siglas en inglés) en la cual se busca el desarrollo de laboratorios portables mediante la integración a nivel de un chip de todos los pasos que se ejecutan normalmente en un laboratorio de análisis químico estandarizado (González-Guerrero et al. 2011) como se puede ver en la Ilustración 2. Para lograr esto, se requieren de biosensores a escalas nanométricas de alta sensibilidad que permitan detectar un analito o sustancia de interés en cantidades muy pequeñas de muestra (del orden de ng/ml o pg/ml) (Justino, Duarte, and Rocha-Santos, 2017).

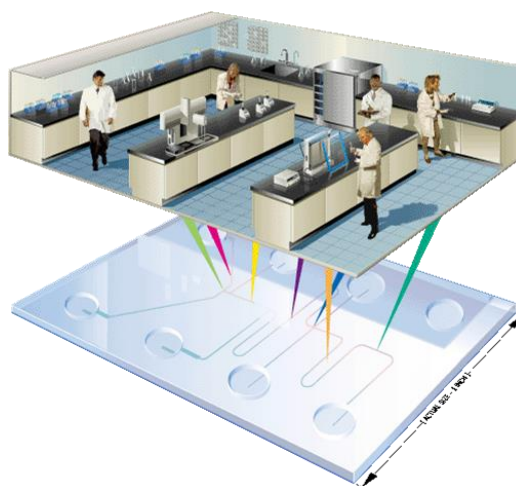


Ilustración 2. Lab-On-Chip

A pesar de ello, la gran diferencia de tamaños entre las secciones de la fibra y los circuitos ópticos integrados hace que el acoplo entre éstos sea clave, pues un acoplo directo entre una guía de silicio -del orden de 500 nm- y una fibra monomodo estándar -con un núcleo de 8 a 10 μm de diámetro- supondría unas pérdidas de acoplo de más de 20 dB, como se ve en la Ilustración 3. Por tanto, es necesario una estructura que permita generar un acoplo eficiente permitiendo el paso de la luz y minimice las pérdidas por acoplamiento.

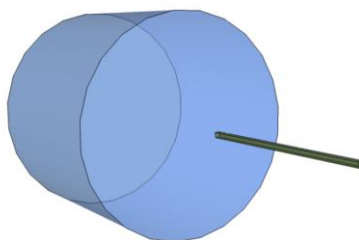


Ilustración 3. Núcleo de una fibra monomodo y guía óptica integrada

Las dos técnicas de acoplo más habituales son el acoplo horizontal con *inverted taper* y el acoplo vertical con *grating coupler* [4], como se ve en la Ilustración 4. El acoplo horizontal por medio de *tapers* invertidos y superpuestos es eficiente si la longitud de estos está cerca de los milímetros, lo que supone un problema en cuanto al tamaño total del dispositivo. Además, necesitan un procesamiento posterior y no pueden ser analizados a nivel de oblea.

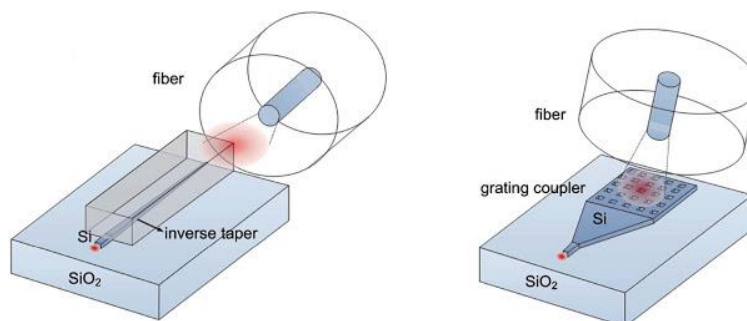


Ilustración 4. Técnicas de acoplo horizontal y vertical

Por otro lado, se utiliza un esquema de acoplo de forma vertical, utilizando *grating couplers*. De esta forma, se consigue un tamaño mucho menor al esquema de acoplo horizontal. La eficiencia de este método depende directamente de la geometría de la estructura, de sus propiedades fotónicas y del ajuste para establecer la posición de la fibra. Mediante esta técnica la luz guiada se acopla fuera del plano y pueden ser analizados a nivel de oblea.

1.2. Objetivos del trabajo

El objetivo principal de este trabajo es el análisis, diseño, simulación, fabricación, caracterización y medida de un acoplador óptico para el rango de funcionamiento de la luz visible mediante la técnica de acoplo vertical *grating coupler* (GC) para estructuras basadas en nitruro de silicio. Se pretende obtener una eficiencia por encima del 15% en el rango visible del espectro.

Dividido en tres partes, la primera corresponde a la teoría y los fundamentos del *grating coupler*. La segunda parte, donde está el grueso del trabajo, plantea 3 diseños *full-etch* para tres ángulos diferentes y un diseño *shallow-etch*. La última parte corresponde a la fabricación, medida y análisis de los resultados de los tres primeros prototipos.

Para ello, ha sido necesario introducir los biosensores nanofotónicos y sus ventajas y limitaciones, la óptica integrada y los dispositivos *Lab-On-Chip* (LOC) y la problemática del acoplamiento óptico.

Seguidamente, se profundiza en la tecnología SOI, se describe el efecto Fabry-Perot, las técnicas de acoplo, la ley de difracción de Bragg, la eficiencia de acoplo y el ancho de banda en un *grating coupler*.

A continuación, se presenta el diseño del dispositivo con sus parámetros y variables. Es necesario introducir el funcionamiento del software de simulación FullWAVE. Se presentan las diferentes configuraciones de diseño y resultados de simulaciones. Además, se muestran las optimizaciones realizadas al prototipo y cómo varían diferentes parámetros. Finalmente, se muestra el proceso de fabricación y medición del chip.

1.3. Metodología

La metodología empleada en este trabajo ha empezado con la documentación y búsqueda de información sobre biosensado nanofotónico y el método de acoplo de *grating coupler*, intensificando el conocimiento en los detalles teóricos de éste y del prototipo exacto que se sigue en este trabajo, *full-etched grating coupler*.

Para la simulación del prototipo, ha sido necesario familiarizarse con el entorno de simulación FullWAVE de RSoft, mediante manuales que tienen disponibles las diferentes herramientas, donde se explica las opciones, diferentes medidas y configuraciones. Además, se ha contado con ejemplos y tutoriales donde se ha presentado con más claridad y practicidad lo anteriormente mencionado, conociendo así las capacidades y limitaciones del software.

El proceso de diseño del dispositivo se ha llevado a cabo con las indicaciones del profesor Jaime García Rupérez, aprendiendo de sus comentarios tras todos los informes realizados de diferentes configuraciones planteadas y simuladas, así como de otros acopladores documentados en otros trabajos y tesis. El proceso de fabricación y medición se ha llevado conjuntamente con el profesor y los técnicos del laboratorio de nanofotónica.

1.4. Etapas

El trabajo ha tenido una duración aproximada de 7 semanas. Las dos primeras semanas han servido para documentarme a cerca de todo el tema de fotónica, tecnología SOI, biosensores nanofotónicos y acopladores ópticos de rejilla o *grating coupler*.

Las posteriores dos semanas he profundizado sobre acopladores ópticos, documentándome sobre las diferentes posibilidades y diseños que se pueden presentar según las características del sistema, así como entender las relaciones entre los diferentes parámetros para manejar perfectamente el diseño. Además, he empezado a leerme los manuales del software y he ido realizando los tutoriales que se indicaban.

Las tres siguientes semanas han sido necesarias para entender perfectamente el programa de simulación y poder realizar mi primer diseño y las primeras pruebas del prototipo, tras muchas pruebas y errores.

En esta etapa he ido conociendo las especificaciones de los dispositivos y materiales utilizados en el Centro de Tecnología Nanofotónica (NTC, por sus siglas en inglés), concretando aún más las características del diseño.

La duración del proceso de diseño ha sido la más extensa y compleja, pues han sido necesarios casi dos meses para llevarlo a cabo, ya que estas simulaciones requieren de mucho cálculo computacional, precisión y un alto rendimiento. Finalmente, en poco más de un mes, se ha conseguido las primeras muestras fabricadas y las mediciones correspondientes.

1.5. Problemas

Los problemas encontrados han sido pocos. La larga duración de las simulaciones y, sobre todo, del barrido de las variables a la hora de optimizarlas ha sido pesada, pues no había realizado este tipo de simulaciones tan duraderas. A pesar de ello, he sabido aprovechar este tiempo intermedio para realizar otras tareas o redacción del documento.

Si bien es cierto que tengo un nivel alto de inglés, no estoy acostumbrado a leer documentos tan extensos durante tanto tiempo en esta lengua. Aun así, he conseguido adaptarme rápidamente a estas lecturas y mi nivel de inglés se ha visto incrementado exponencialmente en cuanto a textos académicos y artículos científicos especializados.

El problema principal encontrado en este proyecto ha sido la medición del chip fotónico pues no se ha podido realizar, ya que el profesor y yo nos hemos dado cuenta de que el equipamiento no era el adecuado para llevar a cabo las mediciones necesarias, pues el *setup* de medida que se dispone en los laboratorios del Centro de Tecnología Nanofotónica no están pensados para medir dispositivos en el régimen visible del espectro, sino infrarrojos y, por lo tanto, no se puede medir la eficiencia de acoplo.

2. Estudio, diseño y análisis del *grating coupler*

2.1. Teoría y fundamentos del *grating coupler*

2.1.1. Silicio sobre aislante (SOI)

Una de las tecnologías más utilizadas en la fotónica integrada es la de silicio sobre aislante (Silicon-On-Insulator o SOI) [5]. Su estructura son capas de distintos materiales una encima de la otra. La capa inferior, un sustrato de un material de alto índice (Si, Si_3N_4 , InP) que suele tener una altura de 675 micras. Encima, una capa de dióxido de silicio (SiO_2) de alrededor de un par de micras. Finalmente, una capa superior de silicio que se graba para realizar la guía de onda por donde viajará la luz, como se ve en la Ilustración 5. La capa de dióxido de silicio evita que la luz guiada por el silicio penetre en el sustrato inferior, ya que la diferencia de índices entre ambos materiales (el índice del sustrato de SiO_2 es inferior al del núcleo de silicio de la guía) produce que el haz de luz se refleje completamente, es decir, ocurre la reflexión interna total.

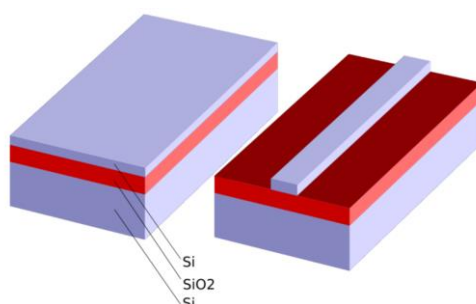


Ilustración 5. Sustrato SOI original y con guía de onda

La fotónica de silicio se beneficia de las ventajas derivadas de la industria microelectrónica en términos de fabricación e integración económicas. Hoy en día, está relacionada con varios campos de aplicación como las telecomunicaciones, sensores o interconexiones ópticas. Entre otros dispositivos, ya se han desarrollado guías de bajas pérdidas [7], receptores ópticos de alta velocidad [8], moduladores ópticos [9] y sensores bioquímicos [10].

2.1.2. Acoplamiento óptico. Efecto Fabry-Perot

Cuando la luz proveniente de una fibra incide sobre el extremo de una guía SOI, se ven empeoradas las prestaciones por el acoplo de la luz a dicha guía. Debido a la gran diferencia de tamaños entre estas, gran parte de la luz incidente se escapa fuera de la guía y aumentan las pérdidas de acoplamiento considerablemente. Esta baja eficiencia se traduce en reflexiones en las caras de la guía que provocan la aparición de una respuesta Fabry-Perot en el espectro.

Cuando una guía ineficientemente acoplada es alimentada por una señal óptica, la señal de entrada se refleja en la cara de entrada de la guía, debido a la reflectividad R de dicha cara. En el otro extremo, la señal llega atenuada por las pérdidas de propagación de la guía, y se vuelve a producir el mismo efecto que en la entrada, reflejándose de nuevo la señal hacia la entrada y se repite reiteradamente hacia ambos sentidos de propagación de la guía, como se ve en la Ilustración 6.

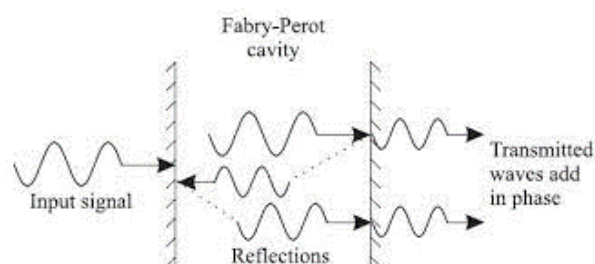


Ilustración 6. Efecto Fabry-Perot

De esta forma, se producen infinitas reflexiones en el interior de la guía que producen oscilaciones en la potencia de salida que distorsionan la señal. Este efecto se conoce con el nombre de cavidad Fabry-Perot.

Para evitar estas cavidades debidas principalmente a la reflectividad en los extremos de la guía es necesario desarrollar técnicas de acoplo eficientes entre guías monomodo SOI y la fibra óptica.

2.1.3. Técnicas de acoplo. *Grating coupler*.

Como se ha mencionado anteriormente, existen dos técnicas fundamentalmente para el acoplo de luz hacia/desde un chip: horizontal y vertical. En el primer caso, la técnica más utilizada es la de *edge-coupling* utilizando un *inverted taper*. Consiste en colocar una fibra con lente para focalizar la luz horizontalmente a la entrada de la guía de ondas, como se muestra en la Ilustración 7. Esta técnica de acoplamiento es independiente de la polarización y presenta un gran ancho de banda. No obstante, se necesita pulir las caras, limita el acoplo a los bordes del chip y necesita una precisión muy alta para alinear correctamente la fibra.

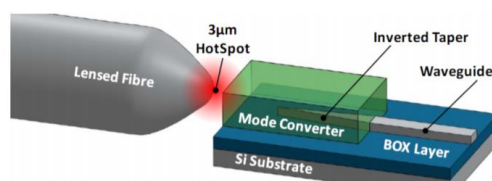


Ilustración 7. Edge-coupling con inverted taper

Por otro lado, el acoplo vertical mediante *grating coupler* consiste en la fabricación sobre la superficie de la guía una estructura periódica en la que se ubica la fibra sobre ella, como se muestra en la Ilustración 8. Tiene un comportamiento como el de una red de difracción de Bragg mediante la cual se consigue acoplar la luz hacia el interior de la guía [11].

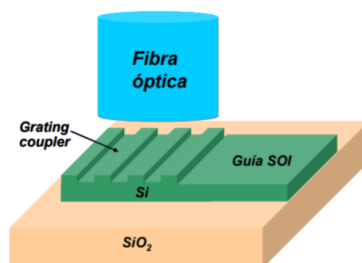


Ilustración 8. Acoplo mediante *grating coupler*

Con esta técnica de acoplo la fibra se posiciona justo encima del chip fotónico con un ángulo de inclinación θ . El *grating coupler* (por sus siglas, GC) es una rejilla de difracción compuesta por una guía de onda con unos surcos periódicos de forma que la luz difractada interfiere constructivamente en la dirección de propagación de la fibra óptica.

Existen dos tipos: *shallow-etch* y *full-etch*. Se diferencian entre ellos por si presentan un grabado parcial o total, respectivamente, en la capa superior, como se observa en la Ilustración 9. El *full-etch* tiene un menor coste y complejidad pues solo es necesario un paso de fabricación, en contra del *shallow-etch* que se necesitan dos pasos.



Ilustración 9. *Shallow-etched* y *full-etched*

Estos dispositivos de acoplo son de reducido ancho de banda y sensibles a la polarización debido a la gran diferencia entre índices de refracción del sustrato SOI. Esto implica una diferencia importante de índices efectivos entre las polarizaciones TE y TM. A pesar de ello, son unos buenos dispositivos ópticos ya que se pueden integrar en cualquier parte de la superficie del chip fotónico.

Los parámetros físicos que se deben considerar se pueden observar en la Ilustración 10. En primer lugar, el periodo o distancia entre surcos Λ_z , la longitud del surco y del diente, w_z y a_z , respectivamente, y el factor de llenado, es decir, la relación entre la longitud del diente y el

periodo $f f_z = \frac{a_z}{\Delta_z}$. Además, se consideran la profundidad del surco ed y la longitud y el ancho lateral del *grating* L_{gr} y W_{gr} , respectivamente.

Otros parámetros fundamentales se deben a los materiales. Se deben considerar los índices de refracción del aire, del dióxido de silicio, del nitruro de silicio y del silicio n_{air} , n_{SiO_2} , $n_{Si_3N_4}$ y n_{Si} , respectivamente. De la misma forma, son clave la altura de la capa de nitruro de silicio y óxido de silicio $H_{Si_3N_4}$ y H_{SiO_2} , respectivamente. Un parámetro muy importante es el ángulo de inclinación θ en el que incide la fibra, y es determinante en la eficiencia de acoplo. Finalmente, se debe tener en cuenta la longitud de onda λ y el tipo de polarización (TE o TM).

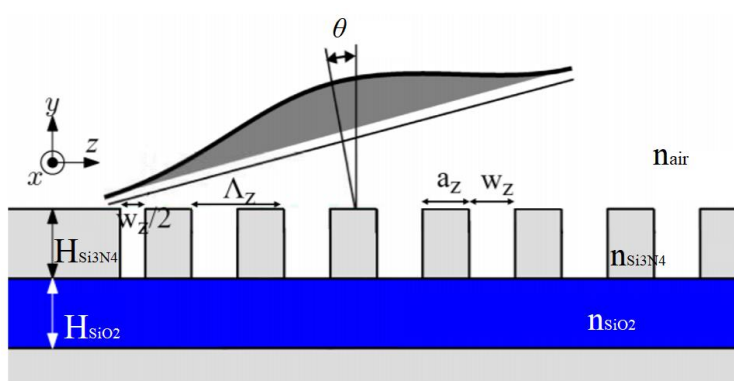


Ilustración 10. Esquema de un grating coupler

El funcionamiento del *grating coupler* se debe a las interferencias constructivas que se producen en las reflexiones de la luz a través de la guía. Gracias a la óptica de rayos podemos determinar que dos rayos incidentes que se reflejan adyacentemente interfieren constructivamente si las dos fases de los rayos son un múltiplo entero de 2π [12]:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = m \cdot 2\pi$$

siendo φ_1 y φ_2 las fases del rayo 1 y rayo 2, respectivamente:

$$\varphi_2 = k_{GC} \cdot \Lambda_z = \frac{2\pi}{\lambda} n_{GC} \cdot \Delta_z$$

$$\varphi_1 = k_{air} \cdot d = \frac{2\pi}{\lambda} n_{air} \cdot \Lambda_z \sin(\theta)$$

donde k_{GC} y n_{GC} son la constante de propagación y el índice efectivo de la zona del GC, respectivamente, k_{air} y n_{air} son la constante de propagación y el índice efectivo del aire, respectivamente, y d representa la diferencia de caminos entre los rayos. Por substitución, se obtiene que el ángulo incidente depende de:

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{n_{GC} - \frac{m\lambda}{\Lambda_z}}{n_{air}} \right)$$

Esta condición es válida si y solo si el módulo del argumento es menor que 1.

2.1.4. Ley de difracción de Bragg

La difracción que ocurre en un acoplador *grating coupler* se puede describir usando la condición de Bragg, que nos muestra la relación entre el vector de onda \mathbf{k}_0 del haz de luz incidente sobre el chip y la constante de propagación β_m del correspondiente haz de luz acoplado a la guía de onda. La condición de Bragg se puede expresar como:

$$\mathbf{k}_0 \cdot \sin(\theta) + m \cdot \mathbf{G} = \beta_m$$

donde \mathbf{G} es el vector de difracción y m es el orden de difracción de rejilla, *grating diffraction*.

La difracción en un *grating coupler* se puede observar en la dirección en la que se consiguen interferencias constructivas:

$$n_{eff} \cdot \Lambda_z - n_c \cdot \Delta_z \cdot \sin(\theta) = m \cdot \lambda$$

donde n_{eff} es el índice efectivo del grating, n_c denota el índice efectivo del modo en el revestimiento (*cladding*). Λ_z es el periodo del grating, θ es el ángulo de difracción y λ es la longitud de onda de la luz incidente. Esta condición solo es válida si la rejilla es infinita, aunque al tratarse de estructuras tan pequeñas bastará con suficientes periodos para obtener un resultado muy cercano al ideal.

Normalmente, el orden de difracción para acopladores suele ser 1, con lo que la condición de Bragg para un *grating coupler* se puede simplificar a:

$$n_{eff} - n_c \cdot \sin(\theta) = \frac{\lambda}{\Delta_z}$$

2.1.5. Eficiencia de acoplo

La eficiencia de acoplo se define como:

$$\eta = P_{in} \cdot (1 - P_{ref}) \cdot O_f$$

donde P_{in} es la potencia radiada a la fibra, P_{ref} la potencia que se refleja de vuelta a la guía de ondas y O_f la integral de superposición entre el campo radiado y el modo de la fibra, es decir:

$$O_f = \frac{\left| \int_S \mathbf{E}_r * \mathbf{H}_{fib}^* dS \right|^2}{Re \left[\int_S \mathbf{E}_r * \mathbf{H}_r^* dS \cdot \int_S \mathbf{E}_{fib} * \mathbf{H}_{fib}^* dS \right]}$$

donde \mathbf{E}_r y \mathbf{H}_r son los campos electromagnéticos de la onda radiada del *grating coupler*, \mathbf{E}_{fib} y \mathbf{H}_{fib} son los modos ópticos del modo de la fibra y S es la cara transversal de la fibra.

La potencia radiada a la fibra, P_{in} , depende directamente de la anchura de la capa intermedia, H_{BOX} , de forma sinusoidal, con periodicidad $\Delta d = (\lambda \cdot \cos\theta)/2n_{box}$.

La integral de superposición, O_f , depende de la fuerza de acoplo, que es proporcional a la diferencia de índices efectivos entre los dientes y los surcos en un periodo de acoplo que, a su vez, depende de la profundidad de grabado.

La potencia reflejada a la guía, P_{ref} , principalmente depende de la diferencia de índices efectivos entre la guía de ondas de la entrada y los surcos del *grating*.

2.1.6. Ancho de banda

Otro aspecto fundamental de los GC es el ancho de banda. Está limitado debido a que, si la longitud de onda cambia, también cambia el ángulo de radiación. Dado que el ángulo tiene que mantenerse fijo por razones prácticas, la eficiencia de acoplo total decrece. Valores típicos de BW_{3dB} están alrededor de 40-60 nm [13].

3. Diseño y optimización del *grating coupler* en el régimen visible

Típicamente, los chips fotónicos se diseñan para trabajar en el rango infrarrojo del espectro, en longitudes de onda correspondientes a la 2ª y a la 3ª ventana de transmisión (alrededor de 1310 nm y de 1550 nm), ya que suelen estar pensados para implementar funcionalidades en esas redes de comunicaciones. Sin embargo, hay otras aplicaciones en las que se tiene más libertad a la hora de elegir la longitud de onda de trabajo como, por ejemplo, a la hora de realizar biosensores fotónicos en los que se utiliza la luz guiada en el chip para la detección de sustancias biológicas. En estos casos, puede ser más conveniente trabajar en el rango visible del espectro, ya que así se evitará el uso de equipos de medida mucho más caros como aquellos pensados para trabajar en el infrarrojo. Así pues, el rango de longitudes de onda que se utilizará para diseñar el chip será de 400 a 750 nm.

Para el diseño y caracterización del *grating coupler* en el rango visible, es necesario cambiar la guía de onda de silicio y utilizar una guía de nitruro de silicio (Si_3N_4). Para este material y estas longitudes de onda (en la región visible y la cercana a la visible) la atenuación es muy baja, menor que $\alpha = 0.1$ dB/cm para $\lambda = 630$ nm [14]. No obstante, se mantiene el óxido de silicio y el silicio como capa dieléctrica y sustrato.

Además, se quiere hacer uso de las capacidades de nanofabricación disponibles en el NTC, de forma que se puedan confirmar las prestaciones de la estructura diseñada. Es por ello por lo que hay que tener en cuenta ciertas especificaciones de diseño:

- Espesor de la capa de nitruro de silicio de 0.3 micras.
- Espesor de la capa de óxido de silicio de 3.26 micras.
- Ángulos de inclinación de 10° y 34°.

Siguiendo estas indicaciones podremos fabricar y medir el dispositivo en el laboratorio, aunque se van a realizar otros diseños con mayor libertad para poder reportar un resultado más eficiente del dispositivo. Simulaciones y optimización del diseño con FullWAVE

Para el diseño del *grating coupler* haremos uso del software de simulación FullWAVE. La herramienta de simulación FullWAVE™ emplea el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) para realizar una simulación vectorial de estructuras fotónicas, calculando el campo electromagnético en función del tiempo y el espacio dada una estructura con una determinada distribución de índice de refracción en respuesta a una excitación electromagnética [15]. Es una herramienta muy sofisticada para estudiar la propagación de la luz en una amplia variedad de estructuras fotónicas, incluidos dispositivos de guía de ondas

integrados y de fibra óptica, así como circuitos y dispositivos nanofotónicos como los cristales fotónicos.

En este software se han de determinar tres componentes fundamentales para el diseño y análisis del *grating coupler*: la geometría del dispositivo, el campo radiado y los monitores para captar la señal fotónica.

En primer lugar, se abre la ventana de inicio donde seleccionamos la herramienta de simulación FullWAVE, un modelo dimensional 2D y una configuración inicial indicando la longitud de onda, los materiales y el ancho del componente, como vemos en la Ilustración 11.

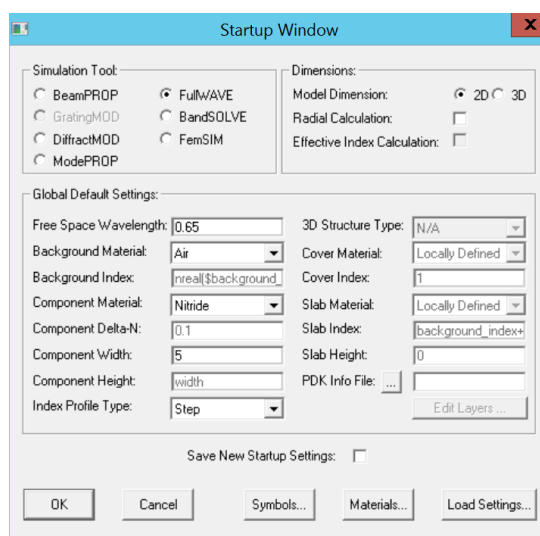


Ilustración 11. Ventana de inicio de FullWAVE

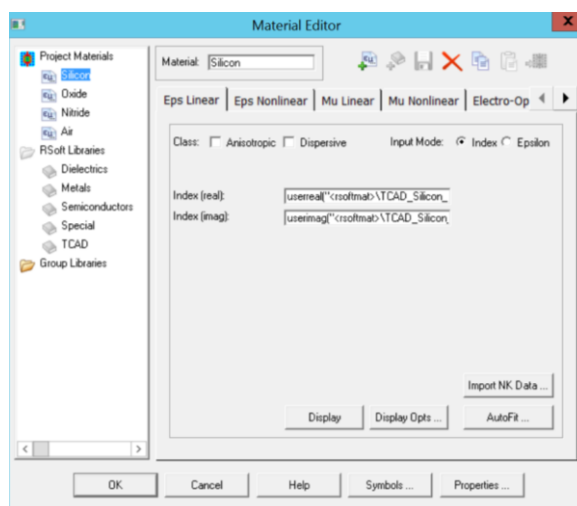


Ilustración 12. Editor de materiales de FullWAVE

Los materiales que se incluyen en este diseño son el silicio, el óxido de silicio, el nitruro de silicio y el aire, creados previamente en el editor de materiales como se ve en la Ilustración 12.

Los símbolos introducidos en el diseño, como se ven en la Ilustración 13, corresponden con los parámetros físicos del dispositivo, como el ángulo (*Angle*), la profundidad de grabado (*Etch_depth*), el factor de forma (*Fill_factor*), la longitud (*L*), el número de periodos (*N*), el periodo (*Period*) y el ancho de los materiales (*W_nitride*, *W_oxide*, *W_substrate*), así como la altura del monitor (*Zmon*):

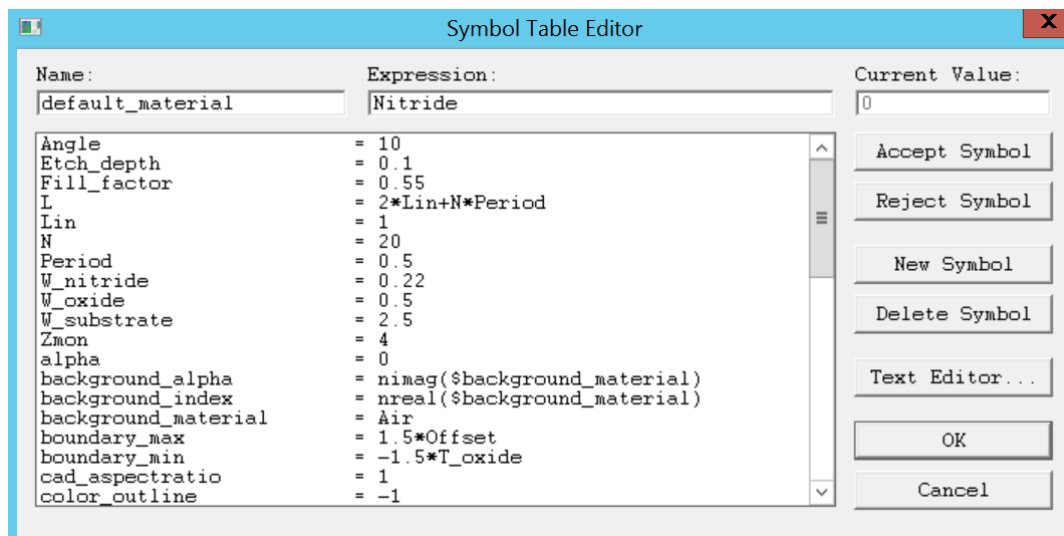


Ilustración 13. Editor de la tabla de símbolos de FullWAVE

A continuación, se diseña la geometría del chip con la herramienta segmento, introduciendo los materiales, y los puntos donde empieza y acaba cada capa, como se ve en la Ilustración 14 en el caso de la guía de onda de nitruro:

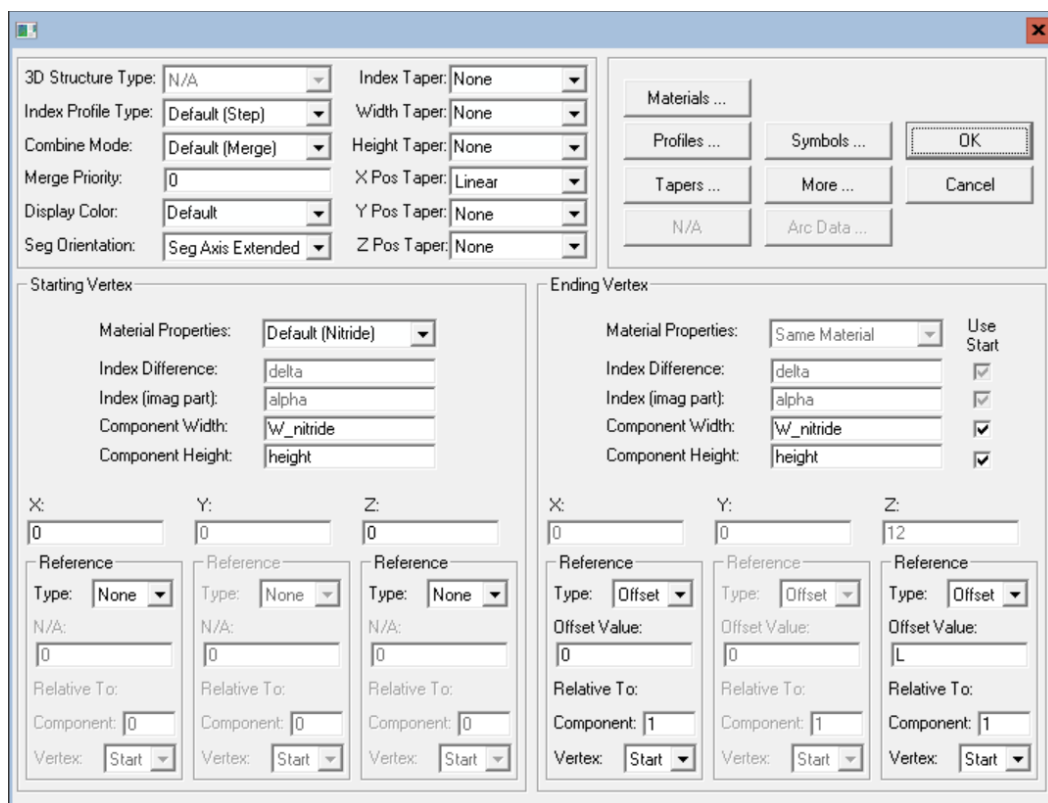


Ilustración 14. Propiedades del segmento en FullWAVE

Así, dibujamos los 3 segmentos que constituyen el chip. Para realizar el *grating* es necesario diseñar una celda unitaria (*unit cell*), como observamos en la Ilustración 15, que introduciremos encima de la guía de onda la cual se repetirá N veces en la dirección de propagación:

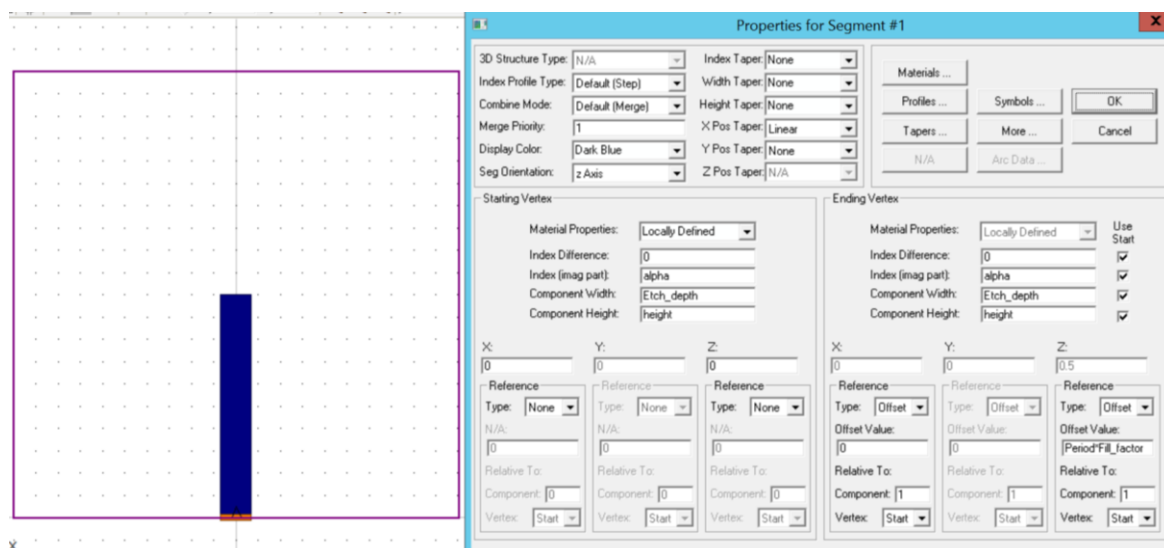


Ilustración 15. Celda unitaria en FullWAVE

Para ello, crearemos una matriz dinámica a partir de esta celda unitaria que, como hemos dicho anteriormente, tendrá una repetición periódica en la dirección de propagación, como se observa en la Ilustración 16:

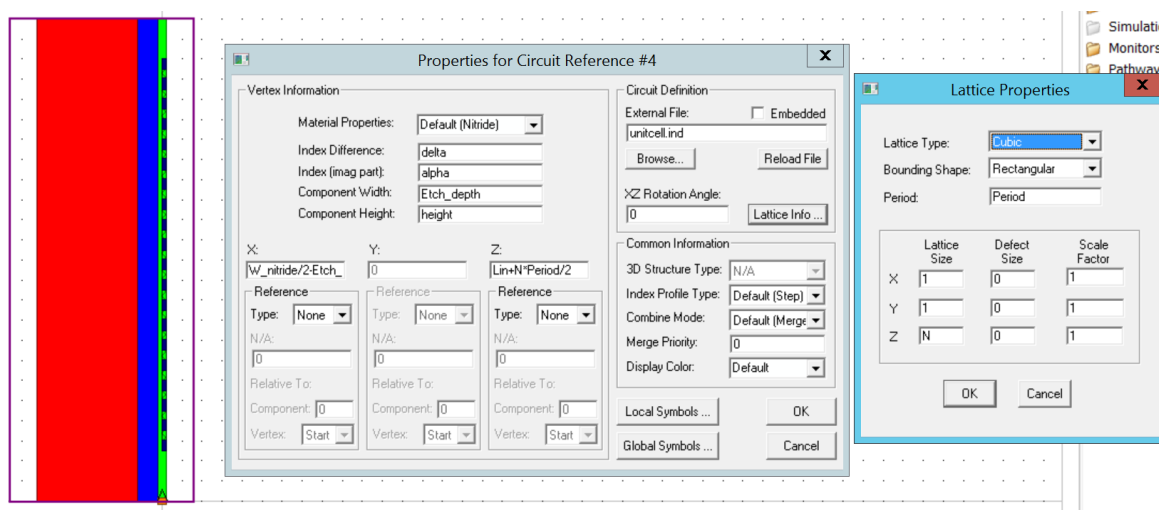


Ilustración 16. Esquemático y propiedades del array dinámico del grating

En segundo lugar, hay que determinar el campo excitante y el camino mediante las herramientas *Launch Field* y *Edit Pathways*, indicando que la luz estará guiada por el primer segmento de nitruro, como se observa en la Ilustración 17.

Finalmente, se colocan los monitores de tal manera que estén repartidos por todo el espacio para tener varios resultados, como se ve en la Ilustración 18, aunque finalmente se mantendrá el que obtenga el mejor valor; así como un monitor detrás de la fuente del campo radiado para medir la potencia reflejada.

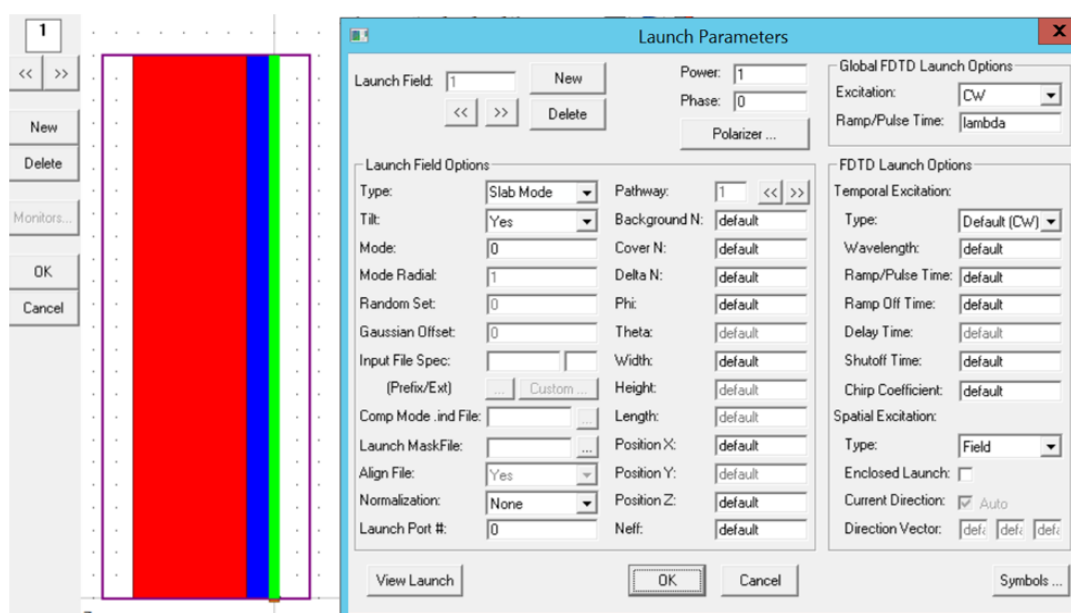


Ilustración 17. Parámetros del campo radiado y su camino en FullWAVE

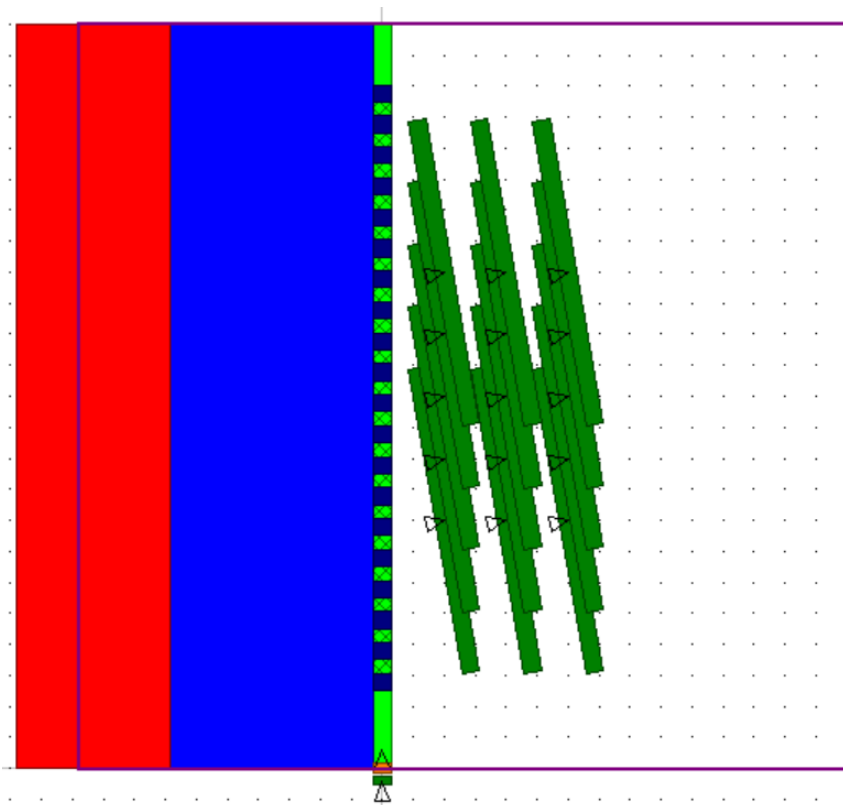


Ilustración 18. Esquemático con los monitores en FullWAVE

Además, podemos obtener el perfil de modos de la estructura, observando que no hay discontinuidades, como se ve en la Ilustración 19. Los campos radiados se pueden observar en la Ilustración 20.

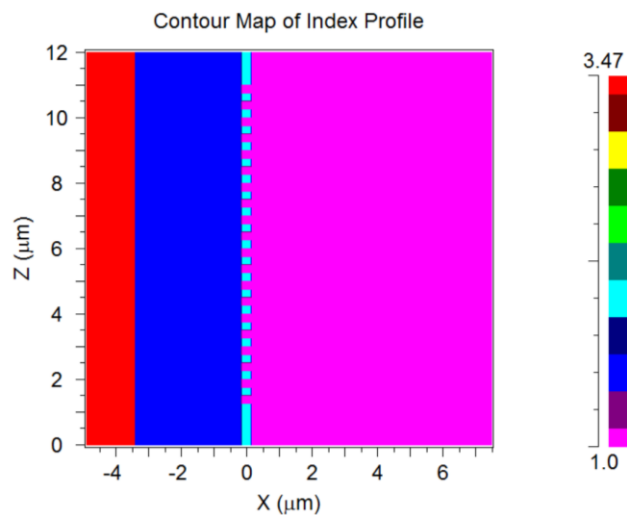


Ilustración 19. Mapa de contorno del perfil de índice en FullWAVE

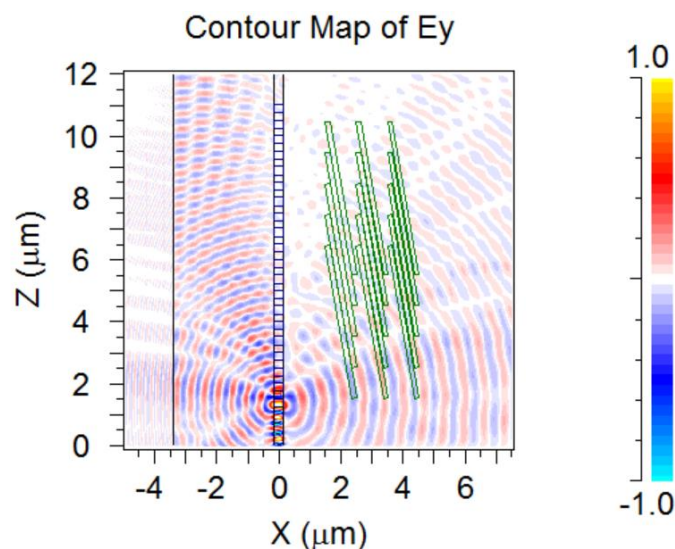


Ilustración 20. Campos electromagnéticos radiados en FullWAVE

Como se puede ver, el sustrato de Silicio presenta condiciones de contorno PML (*Perfectly Matched Layers*), lo que quiere decir que trata al material como si fuera superabsorbente y no refleja los campos hacia la capa de óxido de nuevo, pues el sustrato realmente tiene un tamaño mucho mayor al resto.

3.1. Diseño full-etched

En primer lugar, vamos a diseñar un *full-etched grating coupler*, es decir, un acoplador totalmente grabado por la guía de onda pues, como ya se ha citado, solo es necesario un paso en el proceso litográfico y, por consiguiente, tiene un menor coste de fabricación. Este diseño será el que se fabricará y medirá en el laboratorio del NTC. Aunque solo se dispone actualmente de 2 setups de medida que permiten medir a 10° y 34° , también se presentará un diseño con ángulo de incidencia diferente cuya respuesta sea óptima.

10°

El primer diseño se realiza para un ángulo de incidencia de 10° . A partir de aquí, podemos empezar a simular y barrer variables para encontrar los valores óptimos de acoplo del *grating coupler* para estas especificaciones de diseño. Las variables físicas dependientes que vamos a optimizar son la longitud de onda, el factor de forma y el periodo.

Como se ha mencionado anteriormente, la potencia radiada a la fibra, P_{in} , depende directamente del espesor de la capa inferior de óxido de silicio, H_{BOX} , de forma sinusoidal, con periodicidad $\Delta d = (\lambda \cdot \cos\theta)/2n_{box}$, como se observa en la Ilustración 21.

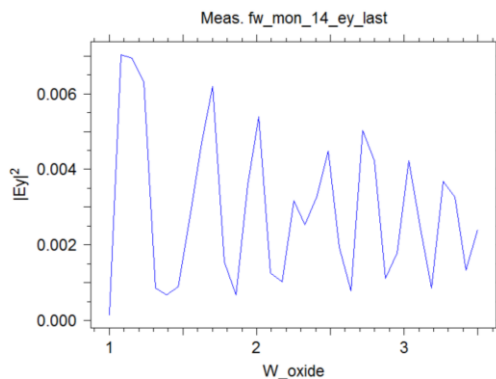


Ilustración 21. Barrido del ancho de la capa de óxido con FullWAVE

Puesto que el espesor del óxido está fijado por las obleas del NTC, será la longitud de onda la que podremos ir variando para encontrar los valores óptimos. Inicialmente, obtenemos la siguiente gráfica para los distintos valores de la longitud de onda en la que presenta un máximo para 600 nm, como se ve en la Ilustración 22:

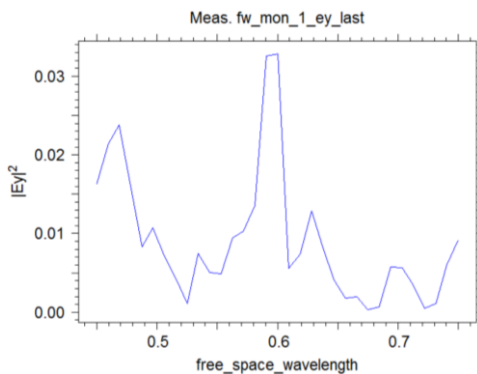


Ilustración 22. Barrido de la longitud de onda en FullWAVE

Para identificar los valores óptimos, se muestra a continuación un barrido del factor de forma en función del periodo para las longitudes de onda de 600 nm, 615 nm, 630 nm, 690 nm, 710 nm y 730 nm:

Primeramente, para 600 nm tenemos el siguiente barrido, donde se observa un máximo para un factor de forma de 0.5 y un periodo de 0.9 μm , como se ve en la Ilustración 23.

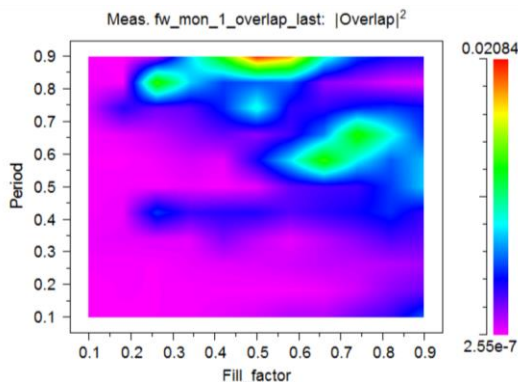


Ilustración 23. Barrido del factor de forma y el periodo a 600 nm en FullWAVE

Para una longitud de onda de 615 nm, se obtiene la siguiente gráfica, visible en la Ilustración 24, en la que se presenta un máximo para un factor de forma de 0.26 y un periodo de 0.42 μm .

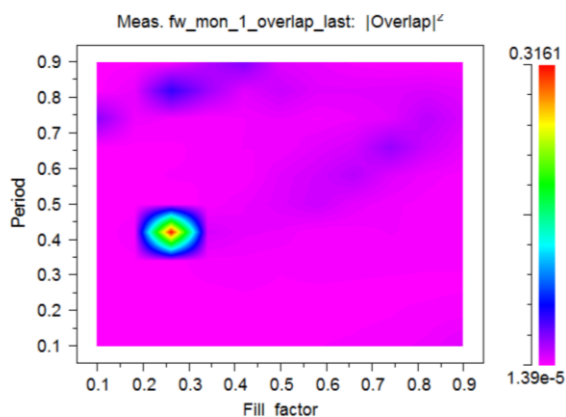


Ilustración 24. Barrido del factor de forma y el periodo a 615 nm en FullWAVE

Seguidamente, para una longitud de onda de 630 nm, podemos observar un máximo para un factor de forma de 0.35 y para un periodo de 0.9 μm , como se ve en la Ilustración 25.

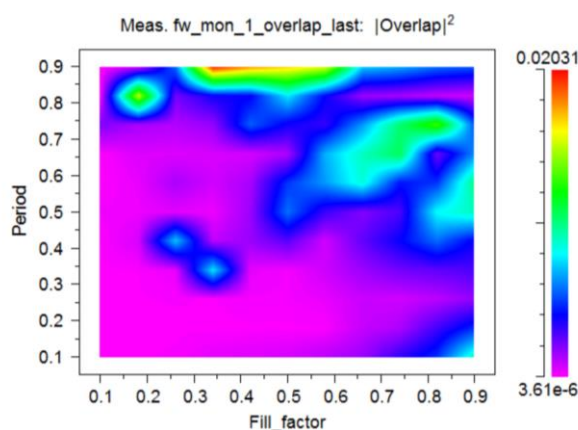


Ilustración 25. Barrido del factor de forma en función del periodo a 630 nm en FullWAVE

A la longitud de onda de 650 nm, la gráfica que muestra el barrido de las variables se puede ver en la Ilustración 26. En esta, se presenta un máximo para un factor de forma de 0.14 y un periodo de 0.42 μm .

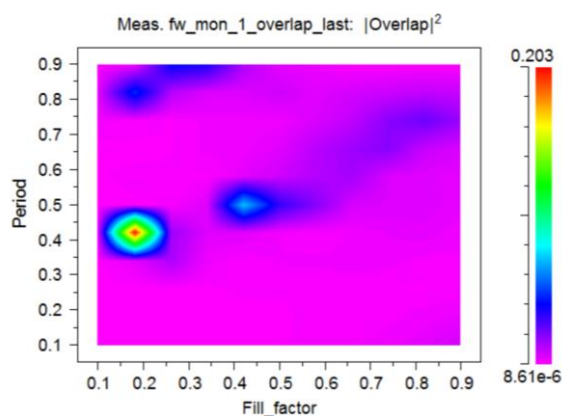


Ilustración 26. Barrido del factor de forma y el periodo a 650 nm en FullWAVE

Para una longitud de onda de 690 nm, el barrido se muestra en la Ilustración 27. Aquí, se puede ver un máximo para un periodo de 0.5 μm y un factor de forma de 0.34.

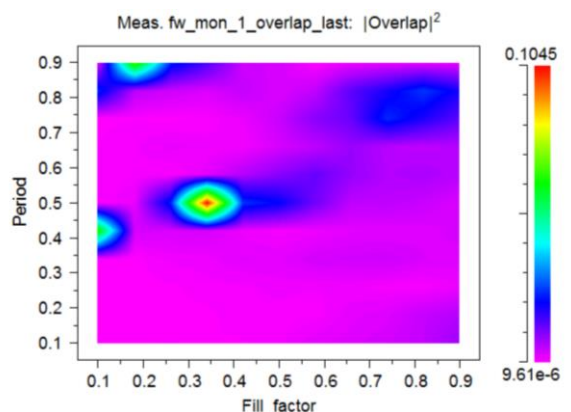


Ilustración 27. Barrido del factor de forma y el periodo a 690 nm en FullWAVE

A la longitud de onda de 710 nm, se optimiza el acoplo para un factor de forma de 0.26 y un periodo de 0.5 μm , como observamos en la Ilustración 28.

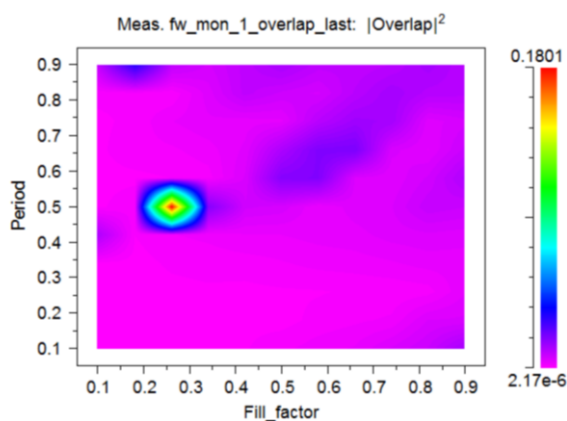


Ilustración 28. Barrido del factor de forma y el periodo a 710 nm en FullWAVE

Para una longitud de 730 nm, el acoplo es máximo para un periodo de 0.58 μm y un factor de forma de 0.42, como se ve en la Ilustración 29.

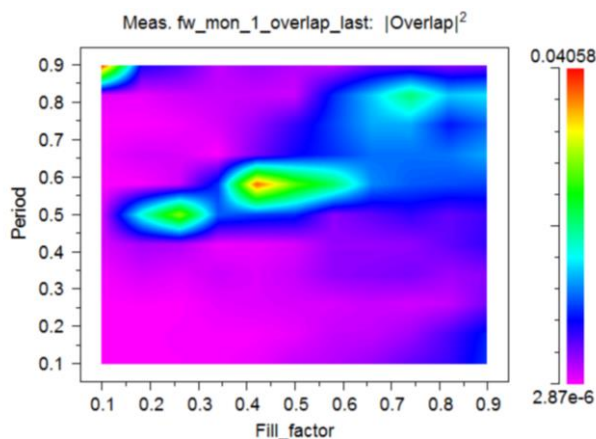


Ilustración 29. Barrido del factor de forma y el periodo a 730 nm en FullWAVE

Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de longitud de onda, periodo, factor de forma y acoplamiento en FullWAVE

Longitud de onda (nm)	Periodo (μm)	Factor de forma	Acoplamiento (%)
600	0.9	0.5	2.1
615	0.42	0.26	31.6
630	0.9	0.35	2
650	0.42	0.14	20.3
690	0.5	0.34	10.5
710	0.5	0.26	18
730	0.58	0.42	4.1

Como podemos ver, el mejor resultado se da para la longitud de onda de 615 nm. Para esta, el resultado del monitor es de 0.3161, es decir, 31.61% de acoplamiento, como se puede ver en la Ilustración 30. Para unas longitudes de onda de 600, 630 y 730 nm se observan unos comportamientos bastante más distintos que las demás, no apreciándose esta “isla” en medio de la gráfica y con una eficiencia ínfima además de un periodo mayor (0.9 μm frente a los 0.42 o 0.5 μm).

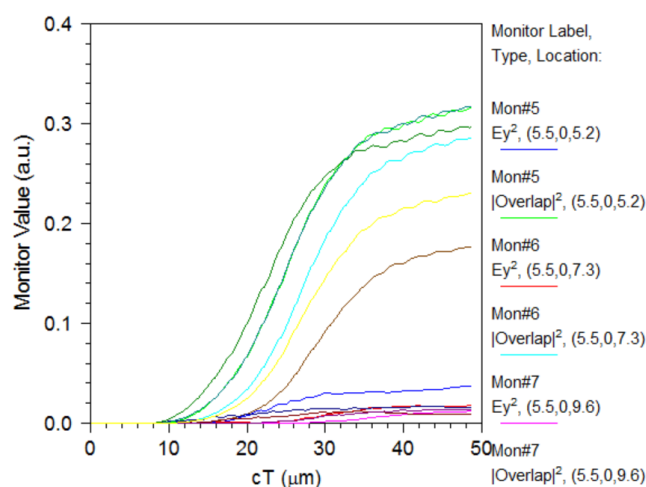


Ilustración 30. Valores del monitor a 615 nm en FullWAVE

Fijando de forma más precisa los valores de longitud de onda y periodo en un rango más ajustado, obtenemos el siguiente barrido como muestra la Ilustración 31:

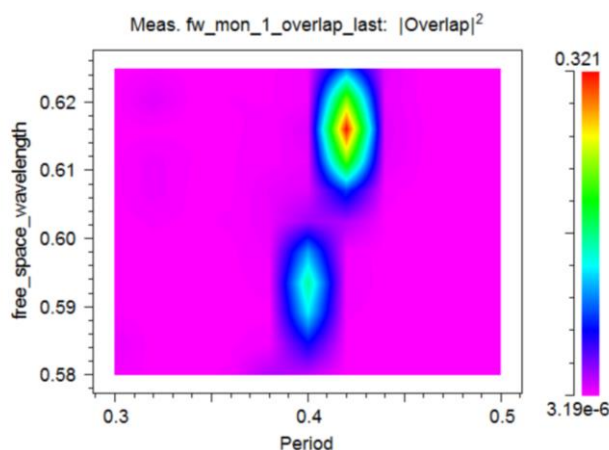


Ilustración 31. Barrido del periodo y la longitud de onda en FullWAVE

En la Ilustración 31, podemos ver una mejoría cambiando el valor de la longitud de onda a 616 nm. Así, el resultado de acoplamiento aumenta hasta el 32.1%. En cuanto al factor de forma y el periodo, su resultado sigue siendo óptimo en 0.26 y 0.42 μm , respectivamente. Finalmente, se optimiza la posición del monitor. Para ello, se escanea las variables *Offset* y *Zmon*, que indican la posición en el eje X y Z, respectivamente, obteniendo un mejor resultado para una posición (1,5) μm . El resultado óptimo mostrado por el monitor es del 33.55%, como muestra la Ilustración 32.

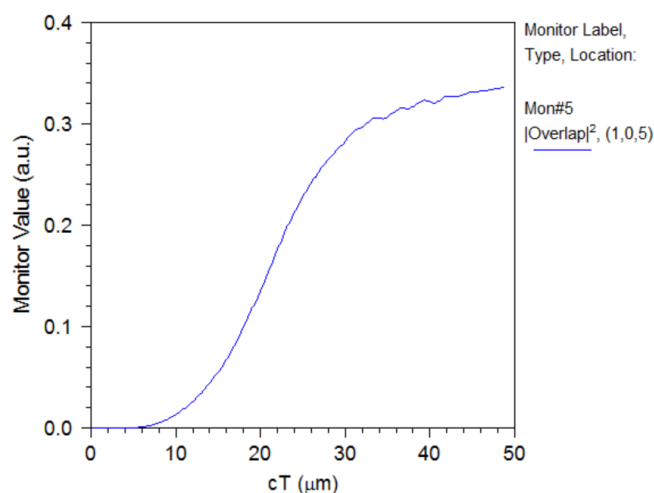


Ilustración 32. Resultado del monitor a 616 nm en FullWAVE

34°

El siguiente diseño que se va a fabricar y medir se optimiza para un ángulo de incidencia de 34°, del cual disponemos posicionadores. Como se ha explicado en la teoría, al cambiar este ángulo, el ancho de banda de acoplamiento se mueve en el dominio óptico y, por lo tanto, su rango de longitudes de onda. Además, su periodo también varía. Es por esto por lo que se van a barrer estas dos variables para el nuevo ángulo de incidencia de 34°, como se muestra en la Ilustración 33.

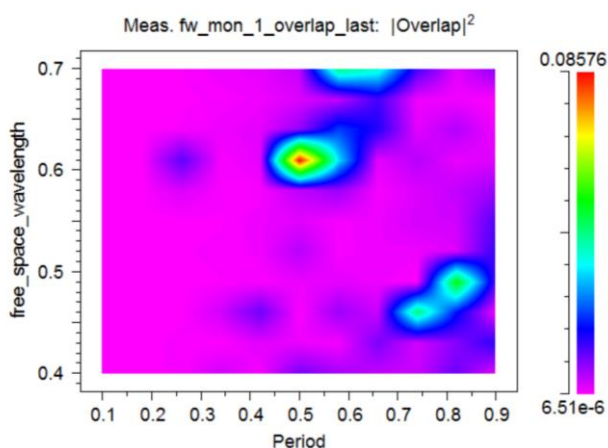


Ilustración 33. Barrido de la longitud de onda y el periodo para 34° en FullWAVE

Aquí, podemos ver como el resultado es mejor para una longitud de onda de 610 nm y un periodo de 0.5 μm . Para esta longitud de onda, se hace un barrido del periodo y el factor de forma, en el que se observa un resultado óptimo para 0.5 μm y 0.26, respectivamente, como muestra la Ilustración 34.

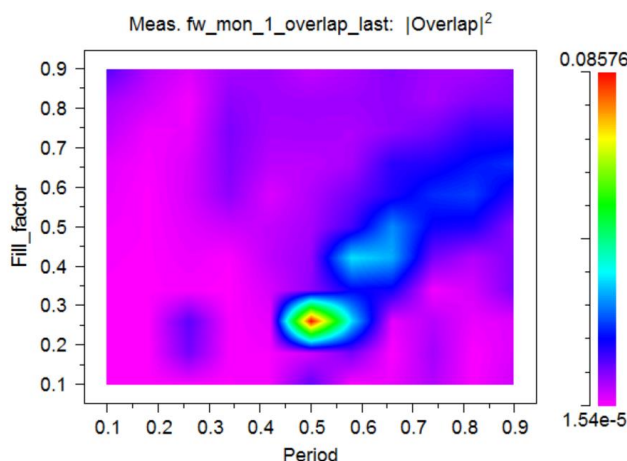


Ilustración 34. Barrido del factor de forma y el periodo para 34° en FullWAVE

Aun así, se repite el proceso seguido anteriormente para el diseño a 10°, es decir, se van a barrer las variables de periodo y factor de forma a distintas longitudes de onda, exactamente, a 550 nm, 565 nm, 590 nm, 610 nm, 650 nm, 680 nm y 710 nm.

La primera longitud de onda, 550 nm, tenemos el siguiente barrido que muestra la Ilustración 35, obteniendo unos valores óptimos para un periodo de 0.9 μm y un factor de forma de 0.7.

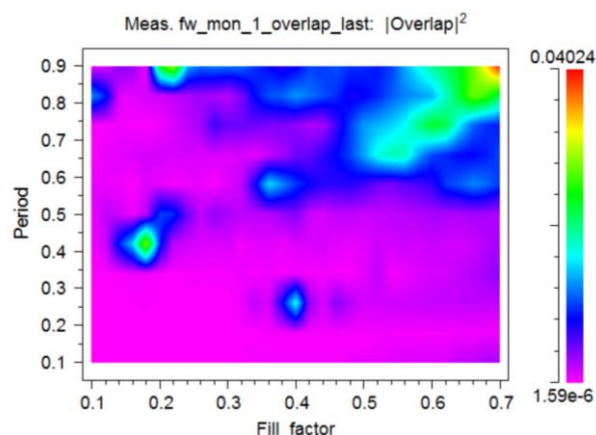


Ilustración 35. Barrido del factor de forma y el periodo a 550 nm en FullWAVE

A 565 nm, el resultado es óptimo para un periodo de 0.5 μm y un factor de forma de 0.36, como muestra la Ilustración 36.

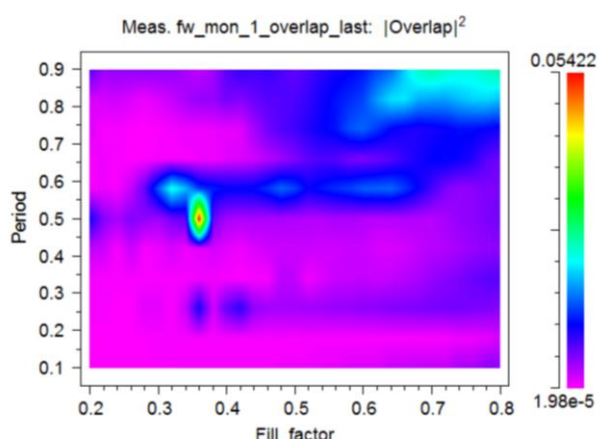


Ilustración 36. Barrido del factor de forma y el periodo a 565 nm en FullWAVE

A 590 nm, el barrido de las variables muestra un resultado óptimo para un factor de forma de 0.3 y un periodo de 0.5 μm , como se ve en la Ilustración 37.

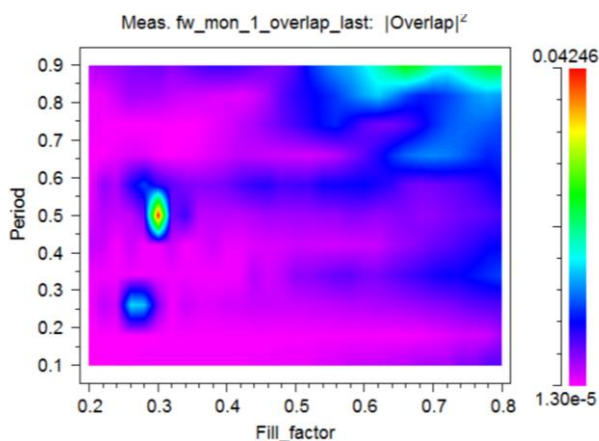


Ilustración 37. Barrido del factor de forma y el periodo a 590 nm en FullWAVE

Para la longitud de onda de 650 nm, el barrido de las variables es óptimo para un factor de forma de 0.44 y un periodo de 0.66 μm , como se ve en la Ilustración 38.

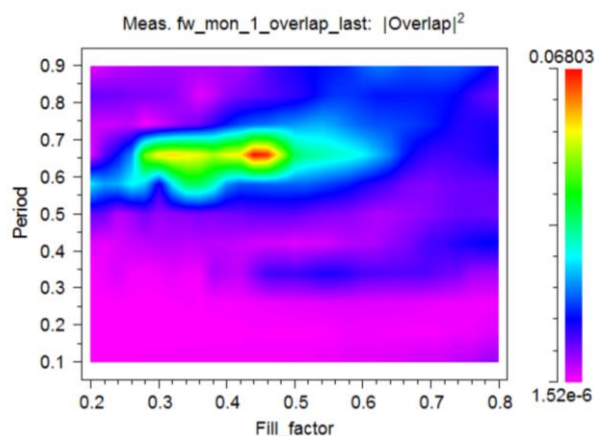


Ilustración 38. Barrido del factor de forma y el periodo a 650 nm en FullWAVE

Para 680 nm, los resultados óptimos se presentan para un factor de forma de 0.28 y un periodo de 0.58 μm , como se observa en la Ilustración 39.

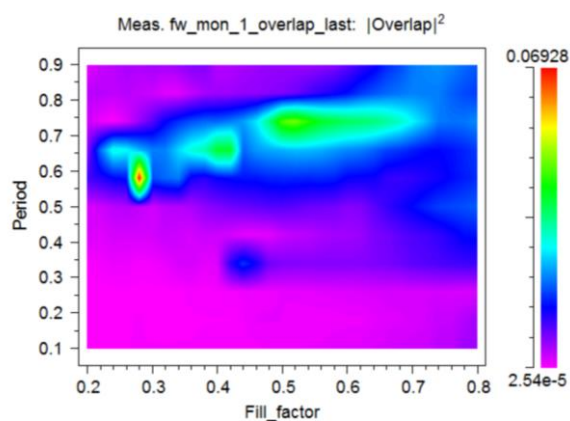


Ilustración 39. Barrido del factor de forma y el periodo a 680 nm en FullWAVE

Finalmente, para 710 nm, el barrido muestra un resultado óptimo para un factor de forma de 0.38 y un periodo de 0.66 μm , como se ve en la Ilustración 40.

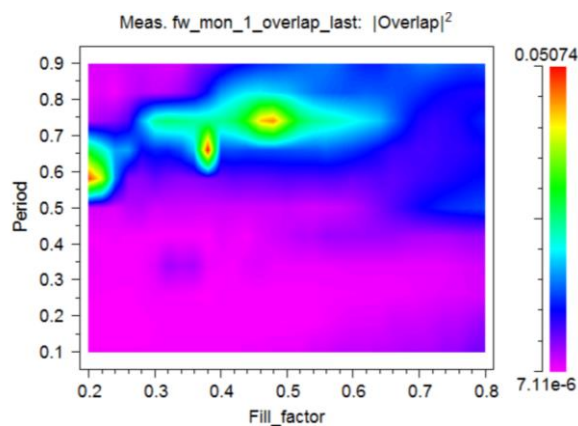


Ilustración 40. Barrido del factor de forma y el periodo a 710 nm en FullWAVE

Los resultados se resumen en la Tabla 2. Podemos apreciar un resultado mejor para la longitud de onda de 610 nm, donde el valor del monitor muestra un acoplamiento del 8,6%. Además, el periodo aumenta aproximadamente a la vez que la longitud de onda aunque se observa un valor disonante para 550 nm en el que el periodo es de 0.9 μm y el acoplamiento es el menor de todos.

Tabla 2. Valores de las variables periodo y factor de forma a distintas longitudes de onda para 34°

Longitud de onda (nm)	Periodo (micras)	Factor de forma	Acoplamiento (%)
550	0.9	0.7	4
565	0.5	0.36	5.4
590	0.5	0.3	4.2
610	0.5	0.26	8.6
650	0.66	0.44	6.8
680	0.58	0.28	6.9
710	0.66	0.38	5.1

A 610 nm, se hace un barrido más preciso y ajustado de las variables, como muestra la Ilustración 41. En esta, observamos un resultado óptimo para un factor de forma de 0.25 y un periodo de 0.5 μm , aumentando el acoplamiento hasta el 12.4%, como muestra el monitor en la Ilustración 42.

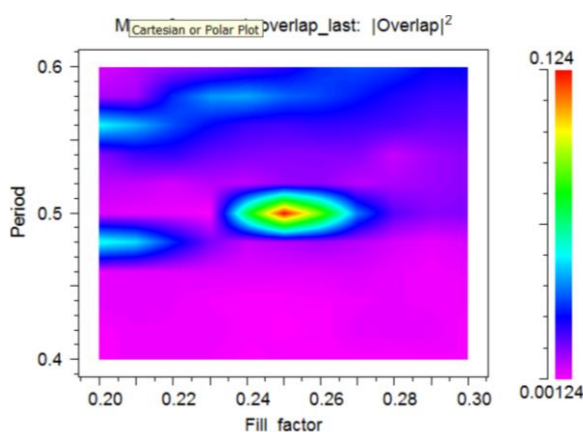


Ilustración 41. Barrido del factor de forma y el periodo para 610 nm a 34° en FullWAVE

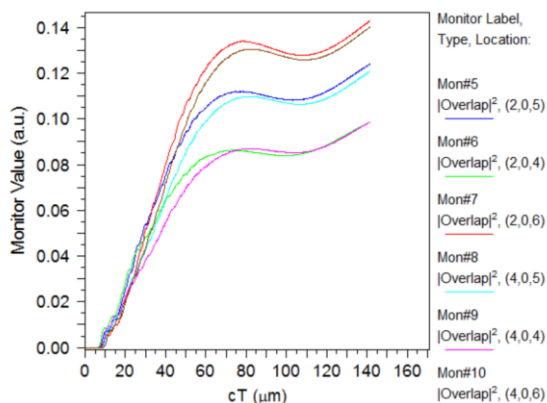


Ilustración 42. Resultado de los monitores para 610 nm a 34° en FullWAVE

De la misma forma, se optimiza la posición del monitor al punto (3.63,7.46) μm desde el origen de coordenadas, alcanzando un acoplamiento del 15.6%, como muestra la Ilustración 42. Así, estos diseños que se van a fabricar y medir presentan las especificaciones que se resumen en la Tabla 3.

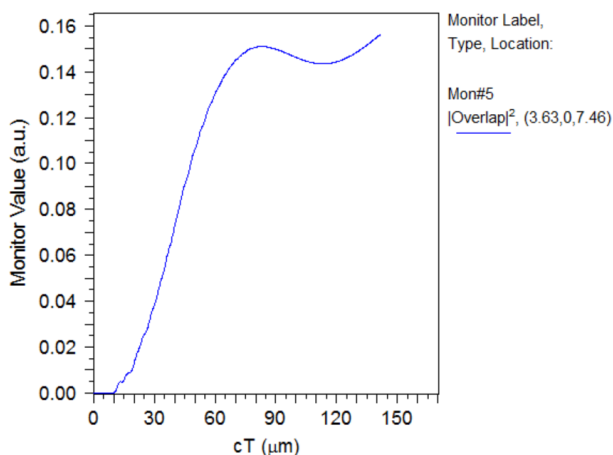


Ilustración 43. Valor del monitor para 34° en FullWAVE

Tabla 3. Especificaciones de los diseños a fabricar a 10° y 34°

Ángulo	10°	34°
Longitud de onda (nm)	616	610
Periodo (μm)	0.42	0.5
Factor de forma	0.26	0.25
Eficiencia de acoplo (%)	33.55	15.60
Posición del monitor (x[μm], z[μm])	(1, 5)	(3.63, 7.46)
Longitud (μm)	10.4	12
Número de periodos	20	

Ancho de la capa de nitruro (μm)	0.3
Ancho de la capa de óxido (μm)	3.26
Profundidad de grabado (μm)	0.3

Se puede ver claramente que la eficiencia de acoplo es más del doble si el ángulo es de 10° . Las demás especificaciones varían mínimamente apreciándose una longitud de onda un poco mayor y un periodo y longitud un poco menores.

Ángulo libre

En tercer lugar, se busca optimizar el diseño para la estructura full-etch. Para ello, se busca el ángulo para el cual el acoplamiento es más eficiente, aun no disponiendo de posicionadores a otros ángulos diferentes a 10° y 34° . Para obtener una primera aproximación, se hace un barrido de la longitud de onda y el ángulo de inclinación, como se observa en la Ilustración 44. Se aprecia un buen resultado para 710 nm a 29.86° .

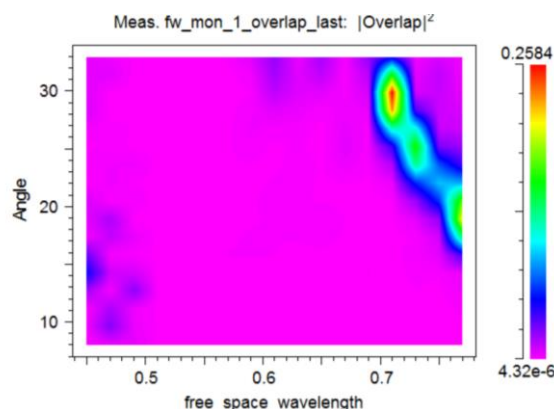


Ilustración 44. Barrido de la longitud de onda y el ángulo en FullWAVE

A continuación, se realiza un barrido del periodo y el factor de forma, donde mejoran para unos valores de $0.6 \mu\text{m}$ y 0.28, respectivamente, como se ve en la Ilustración 45.

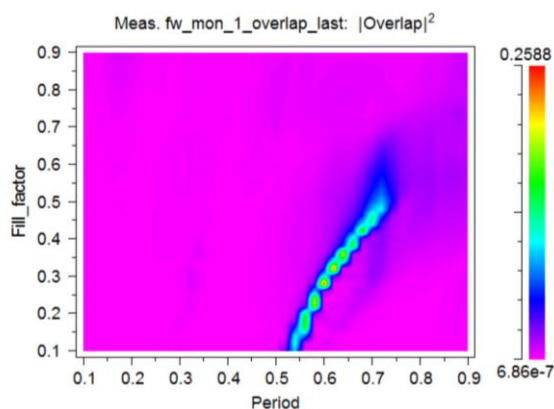


Ilustración 45. Barrido del periodo y el factor de forma para ángulo libre en FullWAVE

De nuevo, para esta configuración, se vuelven a barrer las variables de longitud de onda y ángulo, donde se obtienen unos resultados mejores para 790 nm y 16°, respectivamente, como observamos en la Ilustración 46.

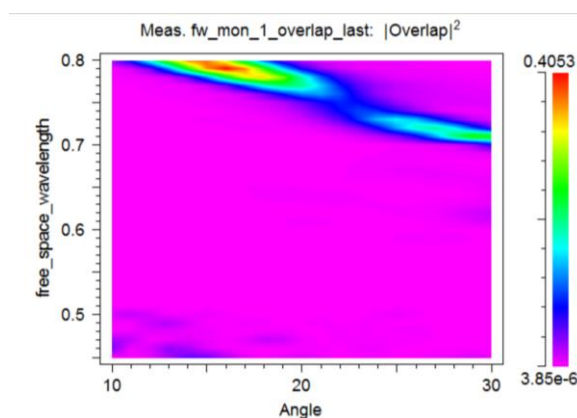


Ilustración 46. Barrido del ángulo y la longitud de onda para ángulo libre en FullWAVE

Se puede apreciar una eficiencia de acoplo del 40.5% en el monitor. Dado que esta longitud de onda forma parte del espectro infrarrojo cercano al visible, primero se repite el barrido del factor de forma y el periodo para una longitud de onda de 650 nm, como se ve en la Ilustración 47 y, seguidamente, se vuelve a barrer el ángulo y la longitud de onda para el rango visible, como muestra la Ilustración 48. Se repiten estas iteraciones hasta converger en unos valores óptimos. En este punto, se escanean las variables de forma más precisa y ajustada como se ha realizado anteriormente con los otros prototipos. Así, el diseño óptimo se obtiene para los valores resumidos en la Tabla 4.

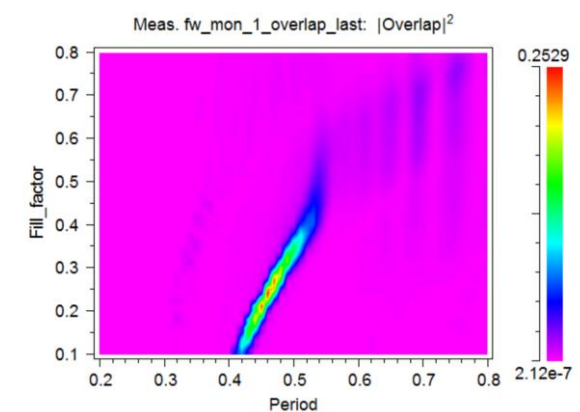


Ilustración 47. Barrido del periodo y el factor de forma a 650 nm en FullWAVE

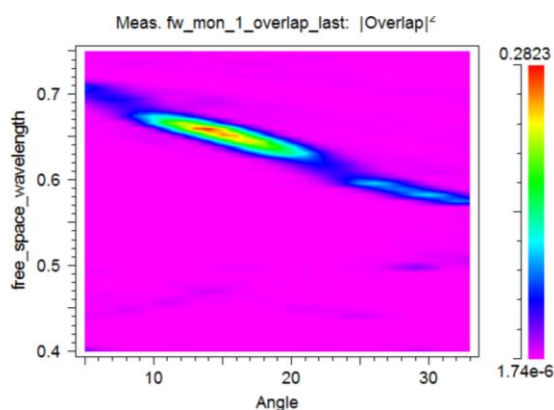


Ilustración 48. Barrido de la longitud de onda y el ángulo en FullWAVE

Tabla 4. Valores óptimos para el diseño de ángulo libre

Ángulo (°)	14.4
Longitud de onda (nm)	690
Periodo (μm)	0.46
Factor de forma	0.24

El monitor, tras ser optimizada su posición, muestra un acoplamiento del 48.5%, como se ve en la Ilustración 49.

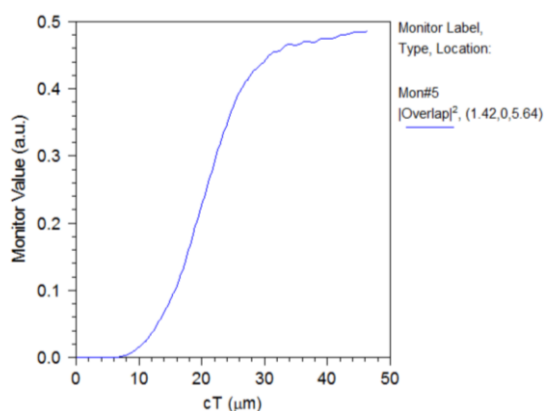


Ilustración 49. Valor del monitor para ángulo libre en FullWAVE

3.2. Diseño shallow-etch

El segundo diseño que se pretende realizar para el acoplador óptico en el rango visible del espectro es el *shallow-etch*, es decir, con un grabado parcial en la guía de onda -y no total, a diferencia del *full-etch*- el cual precisa de un proceso de fabricación más costoso con dos etapas. No obstante, se esperan unos resultados óptimos pues este esquema presenta una eficiencia de acoplo mayor debido a que las reflexiones internas en contradierección son menores con una profundidad de grabado menor como ocurre en el diseño *shallow-etch*.

De la misma forma que los diseños anteriores, el proceso que se sigue para la optimización del diseño se basa en el barrido de las variables de las cuales depende la eficiencia

de acoplo, en este caso, en función de la profundidad de grabado. Así, las Ilustraciones 50, 51, 52 y 53 muestran este barrido para la longitud de onda, el ángulo, el periodo y el factor de forma, respectivamente.

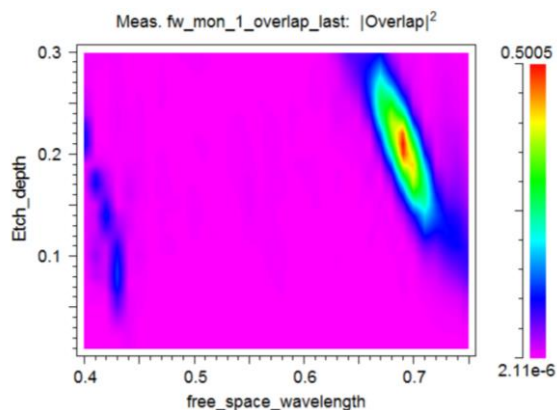


Ilustración 50. Barrido de la longitud de onda en función de la profundidad de grabado en FullWAVE

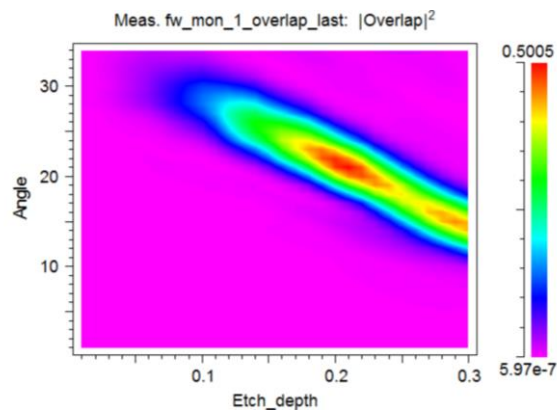


Ilustración 51. Barrido del ángulo en función de la profundidad de grabado en FullWAVE

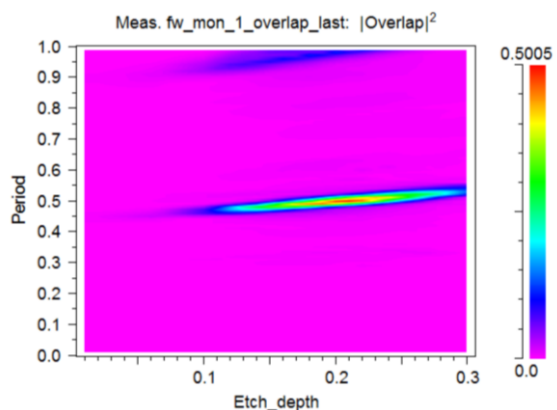


Ilustración 52. Barrido del periodo en función de la profundidad de grabado en FullWAVE

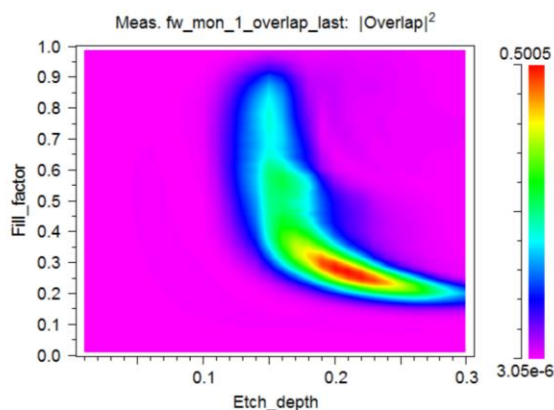


Ilustración 53. Barrido del factor de forma en función de la profundidad de grabado en FullWAVE

Así, los valores óptimos obtenidos muestran una eficiencia de acople del 50.05% y son los siguientes:

- Profundidad de grabado de 0.21 micrómetros
- Longitud de onda de 690 nanómetros
- Ángulo de 21°
- Periodo de 0.5 micrómetros
- Factor de forma de 0.28

En la Ilustración 54 y 55, se comprueban los valores óptimos para el periodo y la longitud de onda, respectivamente, en función del factor de forma verificando las optimizaciones anteriores.

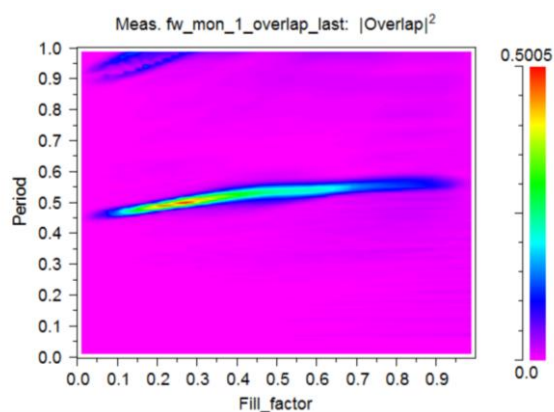


Ilustración 54. Barrido del periodo y el factor de forma para el diseño shallow-etch en FullWAVE

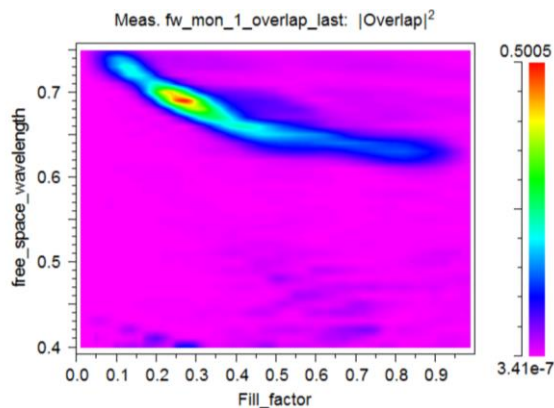


Ilustración 55. Barrido de la longitud de onda y el factor de forma para el diseño shallow-etch en FullWAVE

A continuación, se ajusta la posición y orientación de la fibra optimizando la posición horizontal y vertical y el ángulo de la fibra óptica. Para ello, se barren, por un lado, las variables *Zmon* y *Offset* y, por otro lado, la variable *Angle* en función de la profundidad de grabado, como muestran las Ilustraciones 56 y 57, respectivamente.

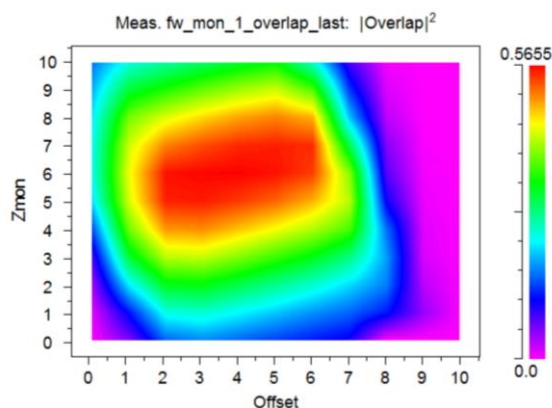


Ilustración 56. Barrido de las variables Zmon y Offset para el diseño shallow-etch en FullWAVE

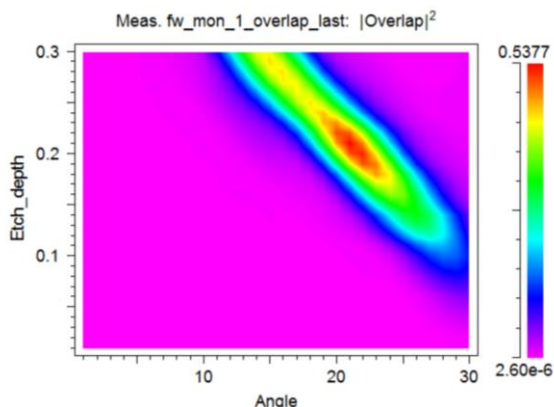


Ilustración 57. Barrido del ángulo y la profundidad de grabado para el diseño shallow-etch en FullWAVE

Así, para una posición de (4, 6) μm respecto al origen de coordenadas y el mismo ángulo y profundidad de grabado, 21° y $0.21 \mu\text{m}$, respectivamente, se obtiene un resultado mejor de eficiencia de acoplo del 56.55%.

Finalmente, se comprueba el número de periodos y se obtiene el valor óptimo de eficiencia de acoplo del 59.44% para 36 periodos, como muestra la Ilustración 58.

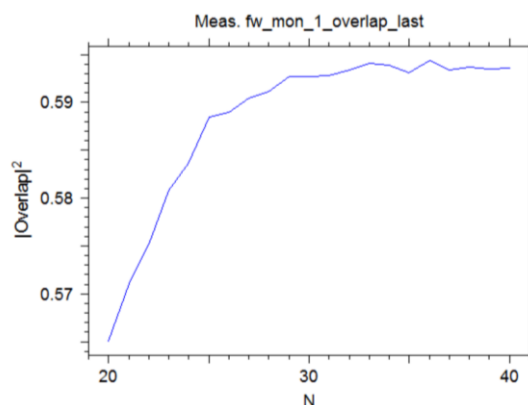


Ilustración 58. Barrido del número de periodos en FullWAVE

De esta forma se obtiene el esquema deseado con las especificaciones resumidas en la Tabla 5.

Tabla 5. Especificaciones del diseño shallow-etch

Ángulo ($^\circ$)	21
Longitud de onda (nm)	690
Periodo (μm)	0.5
Factor de forma	0.28
Eficiencia de acoplo (%)	59.44
Posición del monitor (x[μm], z[μm])	(4, 6)
Longitud (μm)	20
Número de periodos	36
Ancho de la capa de nitruro (μm)	0.3
Ancho de la capa de óxido (μm)	3.26
Profundidad de grabado (μm)	0.3

Estas especificaciones casi duplican al mejor diseño *full-etch*, con una eficiencia de acoplo del 59.44% frente al 33.55%. No obstante, cabe recordar que este diseño es más costoso de fabricar.

3.3. Fabricación y medición del *full-etch grating coupler*

3.3.1. Fabricación del acoplador óptico

La fabricación del chip se ha llevado a cabo en el Centro de Tecnología Nanofotónica (NTC) de la Universitat Politècnica de València (UPV), mostrado en la Ilustración 59. Este centro cuenta con una sala limpia de 250 m² de clase 10-100-1000-10000 (la clase 10 tiene menos de 10 partículas mayores de 0.5 μm por pie cúbico de aire) la cual dispone de bancos húmedos y centrifugadora de enjuague en seco, necesarios para el recubrimiento del fotorresistor; sistemas de litografía mediante haz de electrones; sistemas de grabado en seco; y sistemas de deposición física de vapor necesarios para depositar la capa de óxido de silicio sobre el chip.



Ilustración 59. Sala limpia del NTC en la UPV

El primer paso para la fabricación es la limpieza con plasma de la oblea para eliminar posibles impurezas o contaminantes. A continuación, se obtiene el archivo .gds con un algoritmo creado por el profesor Jaime en base a las especificaciones físicas de los diseños. Así, se alinea y se expone la oblea para diseñar el chip utilizando la técnica de exposición litográfica de haz de electrones, la cual permite una escritura directa y una alta resolución. Seguidamente se realiza el grabado eliminando el nitruro silicio de las áreas no deseadas llevando a la superficie el patrón diseñado y, finalmente, la oblea se limpia y se seca.

La diferencia en el proceso de fabricación entre un *shallow-etch* y un *full-etch* se puede ver en la Ilustración 60. Como se ha repetido reiteradamente, el coste de fabricación del *grating coupler* totalmente grabado es menor que el parcialmente grabado.

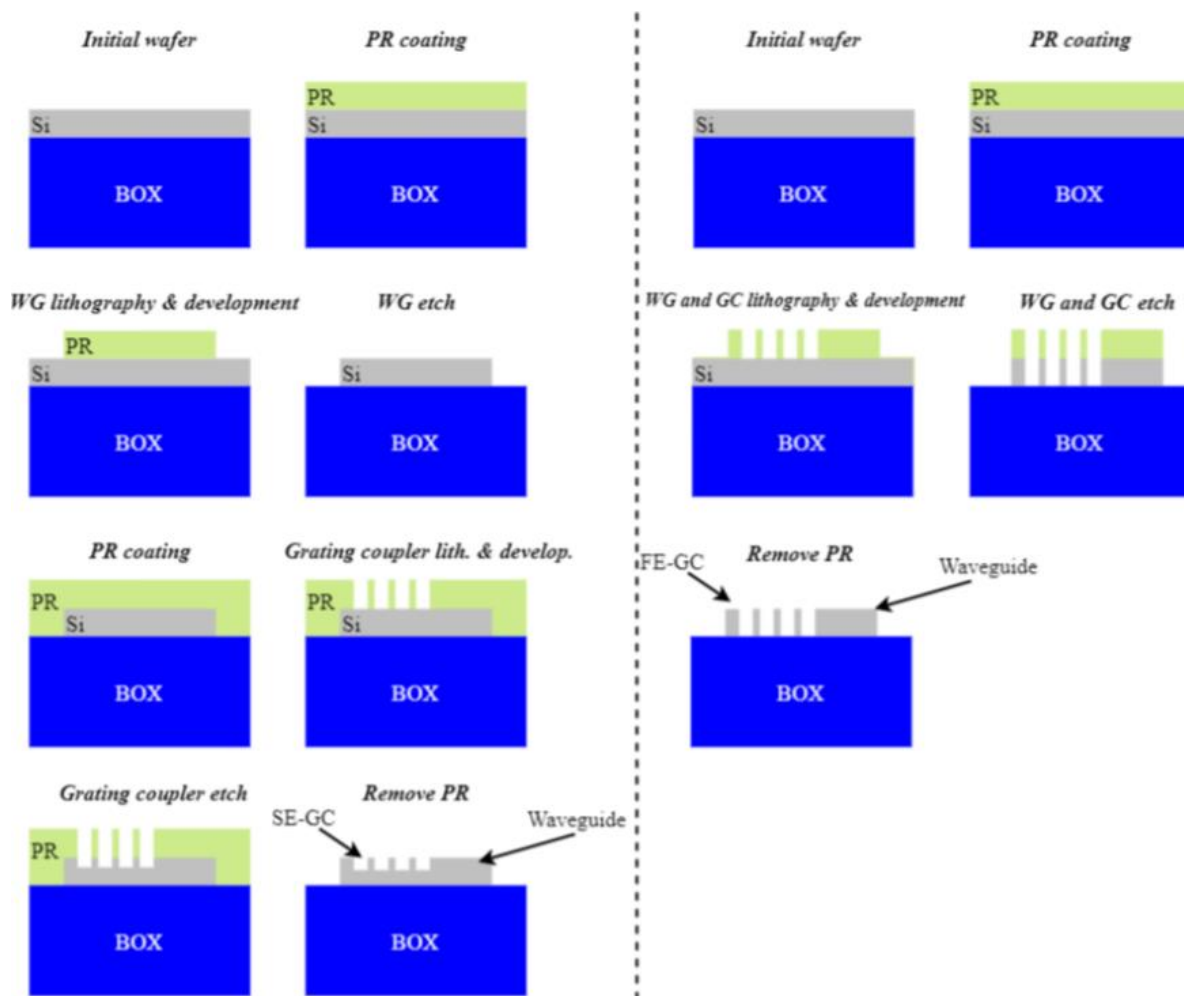


Ilustración 60. Diferencia en el proceso de fabricación del shallow-etch y el full-etch

Tras el proceso de fabricación, los técnicos del laboratorio fotografían el chip fotónico mediante microscópicos electrónicos, obteniendo las imágenes que se muestran en las Ilustraciones 61, 62, 63, 64 y 65.

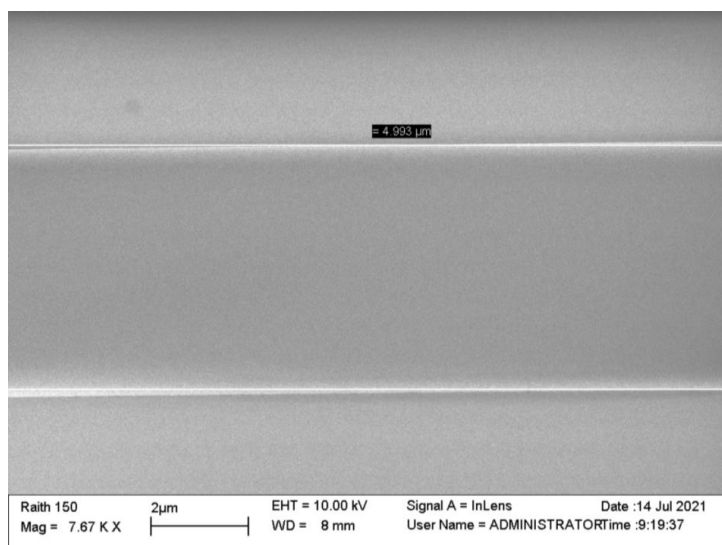


Ilustración 61. Fotografía de la guía de ondas

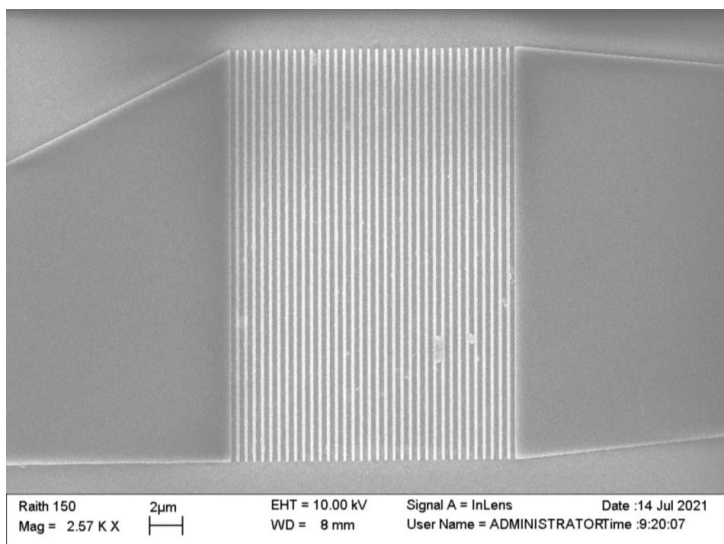


Ilustración 62. Fotografía del grating coupler

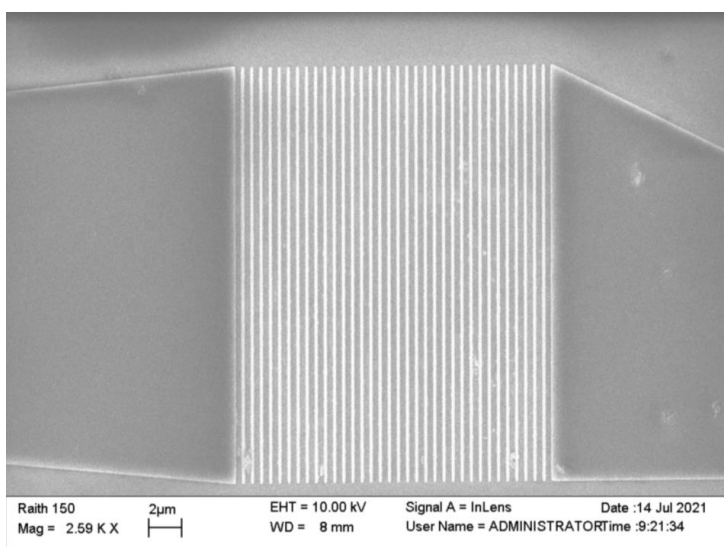


Ilustración 63. Fotografía del grating coupler

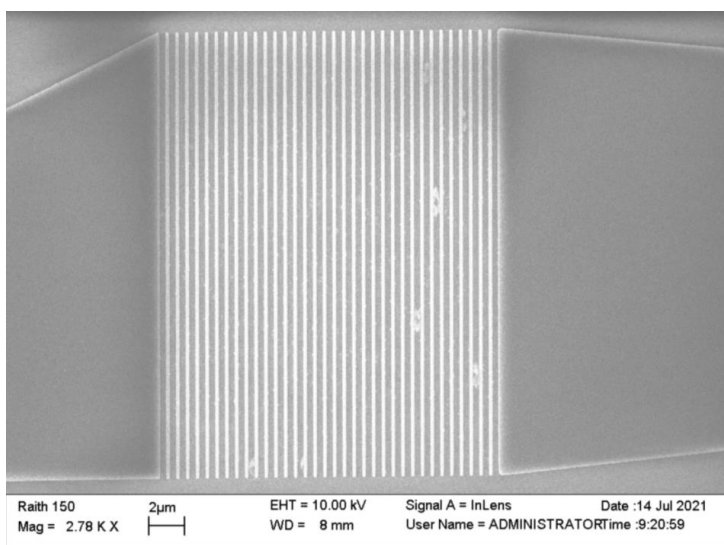


Ilustración 64. Fotografía del grating coupler

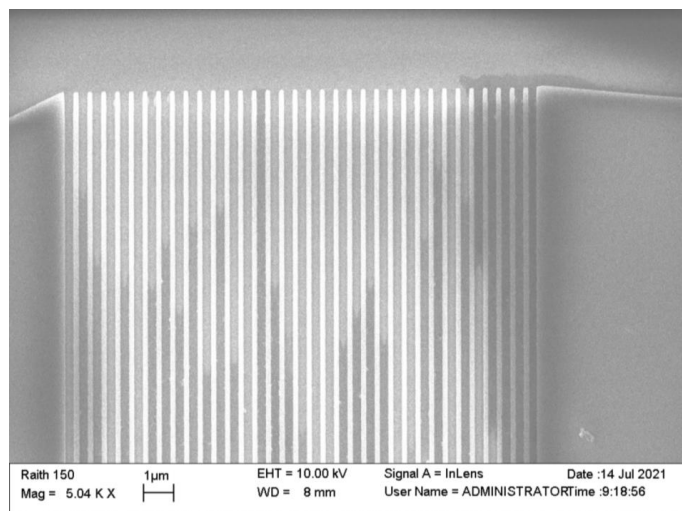


Ilustración 65. Fotografía del grating coupler

En estas imágenes, fotografías del *grating coupler* desde arriba, podemos comprobar las características físicas del dispositivo, en el que se corresponde con el diseño realizado y mandado al laboratorio del NTC. Las fotografías muestran el diseño realizado para 34° , en el que se puede medir un periodo y un factor de forma de $0.5 \mu\text{m}$ y 0.25 , respectivamente.

3.3.2. Medición del chip fotónico

El *setup* de medida empleado es el siguiente:

- Una bombilla halógena HL-2000 de *Ocean Optics* como fuente óptica, cuyo espectro, el cual podemos ver en la Ilustración 66, abarca desde los 260 nm hasta los 1000 nm

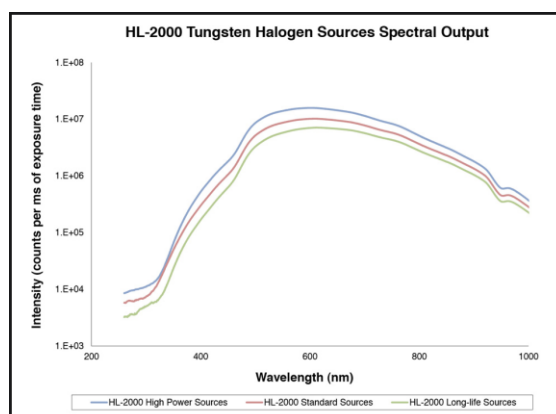


Ilustración 66. Espectro de la fuente óptica

- Un espectrómetro FLAME-T-XR1-ES de *Ocean Optics* para medir la reflectividad

Este proceso no ha sido posible pues, teniendo en cuenta que este Trabajo Final de Grado era un reto tanto para mí como para el Profesor Jaime Rupérez como líder de grupo de

biofotónica del NTC, aun habiendo diseñado y simulado correctamente los diseños del *grating coupler* con FullWAVE de RSoft, los laboratorios del NTC no disponen del equipamiento necesario para realizar estas mediciones. El *setup* de medida para el rango visible no está pensado para medir guías integradas, sino para medir la reflexión en una superficie. La fuente proporciona un haz de luz muy grande de 2 a 3 mm que hace que en caso de acoplarse potencia al *grating coupler*, ésta sería una porción muy pequeña del total; y parte de ese haz de luz tan grande es recogido por la fibra de salida. Así pues, desafortunadamente, lo que se termina visualizando en el monitor es la reflexión de la superficie del chip por falta del equipamiento adecuado para estructuras pensadas para el rango visible del espectro, que será necesario adquirir para poder seguir realizando estas investigaciones.

4. Conclusiones

En este Trabajo Final de Grado respecto al diseño de elementos de acoplo vertical para la interrogación de chips fotónicos en el régimen visible reporta la viabilidad de la implementación de *grating couplers* en este rango del espectro, abaratando los costes relacionados con el uso de infrarrojos y sus dispositivos de fabricación y medida.

Se puede verificar el objetivo del TFG pues es posible conseguir una eficiencia de acoplo superior al 15% para un *grating coupler* cuyo ángulo de inclinación es de 10°. Además, se consiguen eficiencias de acoplo aún mayores para 34°, siendo esta mayor del 30%, es decir, más del doble. Estos diseños se corresponden para un diseño totalmente grabado, cuyo coste de fabricación es menor al *shallow-etch*. Yendo aún más lejos, se ha diseñado y simulado un GC parcialmente grabado con una eficiencia superior al 50%, un resultado bastante mayor al esperado, aunque es lógico que este diseño sea óptimo pues las reflexiones y, por lo tanto, las pérdidas son menores.

En futuros trabajos e investigaciones se podría disponer del equipamiento adecuado para realizar estas medidas para el rango visible pues nuevas aplicaciones están relacionadas con este régimen de funcionamiento. Aparte de toda la tecnología puntera en fotónica, el campo de la biofotónica puede ser realmente importante e innovador en cuanto a los biosensores fotónicos pues, en comparación a los sistemas actuales de sensado, los sistemas ópticos son más seguros, rápidos y baratos. Es por ello por lo que los acopladores diseñados son un punto clave para interconectar sistemas ópticos con la mayor eficiencia de acoplo posible.

5. Bibliografía

- [1] Centre for Advanced Photonics & Process Analysis, “What is Photonics?”, <http://www.cappa.ie/about-cappa/what-is-photonics/>.
- [2] M. Vachon et al. A. Densmore, “Silicon photonic wire biosensor array for multiplexed real-time and label-free molecular detection”, *Opt. Lett.*, 2009.
- [3] Dey, D. and Goswami, T, “Optical biosensors: a revolution towards quantum nanoscale electronics device fabrication”, *J. Biomed. Biotechnol.*, 2011, <http://dx.doi.org/10.1155/2011/348218>.
- [4] Galán Conejos, Jose Vicente, “Modelado, análisis y diseño de una técnica de acoplo eficiente entre fibra óptica y circuitos integrados ópticos de silicio”, UPV, 2007, <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12326/TESINA%20MASTER%20-%20JV%20GALAN.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [5] Oriol Gili de Villasante, “Design and Simulation of Vertical Grating Coupler for Photonic Integrated System-in-Package”, Tesis doct., 2010.
- [6] 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*, 2006. <http://stacks.iop.org/1347-4065/45/i=8R/a=6071>
- [7] J. Cardenas, C. B. Poitras, J. T. Robinson, K. Preston, L. Chen, and M. Lipson, “Low loss etchless silicon photonic waveguides”, *Opt. Express*, 2009. <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-17-6-4752>
- [8] G. M.V.S.S. G. T. Pinguet B. Analui, “40-Gbps monolithically integrated transceivers in CMOS photonics”, *Proc.SPIE*, 2008. <http://dx.doi.org/10.1117/12.766865>
- [9] G. T. Reed and C. J. Png, Silicon optical modulators, *Materials Today*, 2005, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702104006789>
- [10] V. Toccafondo, J. García-Rupérez, M. J. Bañuls, A. Griol, J. G. Castelló, S. Peransi-Llopis, and A. Maquieira, “Single-strand DNA detection using a planar photonic-crystal-waveguide-based sensor”, *Opt. Lett.*, 2010. <http://ol.osa.org/abstract.cfm?URI=ol-35-21-3673>

[11] D. Taillaert, W. Boagerts and R. Baets, “Efficient coupling between submicron SOI-waveguides and single-mode fibers”, University of Gent, 2003.

[12] M. C. Wu, “Grating couplers”, Lightwave Devices course, 2017.

[13] R. Halir, A. Ortega-Moñux, J. H. Schmid, C. Alonso-Ramos, J. Lapointe, D. X. Xu, J. G. Wangüemert-Pérez, Molina-Fernández, and S. Janz, “Recent Advances in Silicon Waveguide Devices Using Sub-Wavelength Gratings”, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014.

[14] W. Streifer W. Stutius, “Silicon Nitride films on silicos for optical waveguides”, 1997.

[15] SYNOPSIS, RSoft - FullWAVE v2016.09, “User Guide”, SYNOPSIS, 2016.