



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



**Máster Universitario**  
en Tecnologías, Sistemas y  
Redes de Comunicaciones

# **Desarrollo de Estructuras de Acoplo Eficientes para Circuitos Integrados Fotónicos**

*Autor:* Roberto Alejandro Larrea Luzuriaga

*Director 1:* Pablo Sanchis Kilders

*Director 2:* Ana María Gutiérrez Campo

*Fecha de comienzo:* 1/03/2015

*Fecha de finalización:* 1/09/2015

*Lugar de trabajo:* Centro de Tecnología Nanofotónica NTC



*Objetivos —*

El objetivo de este trabajo es diseñar y optimizar mediante simulación (grating couplers), estructuras de acoplo eficientes, que permitan acoplar luz de manera vertical entre una fibra óptica monomodo y una guía de onda de un circuito integrado fotónico (PIC de sus siglas en inglés Photonic Integrated Circuit), así como también realizar la caracterización mediante medida de la estructura de acoplo fabricada con el fin de determinar la eficiencia de la estructura además de las pérdidas de propagación y pérdidas de acoplo.

*Metodología —*

Diseño.- A partir de conceptos teóricos se diseñará una estructura grating que permita acoplar el modo de propagación de una fibra óptica monomodo a una guía de onda de un PIC o viceversa.

Simulación y Optimización.- Con la simulación del diseño y la evaluación de los resultados, se variaran ciertos parámetros de diseño de modo que se obtengan los valores óptimos que permitan alcanzar la máxima eficiencia de acoplo posible.

Fabricación.- Se fabricarán gratings con los parámetros optimizados mediante simulación. Dicho proceso se realizará en las instalaciones del NTC.

Caracterización.- Se realizará las medidas de las muestras fabricadas, de modo que en el escenario implementado para medición se registren los resultados, que luego serán procesados de manera que se pueda obtener la eficiencia de la estructura, las pérdidas por inserción y ancho de banda de operación, las pérdidas de propagación, y pérdidas de acoplo.

*Desarrollos teóricos realizados —*

Se han realizado varios programas en Matlab para procesar los datos de simulación y obtener las gráficas resultantes.

*Desarrollo de prototipos y trabajo de laboratorio —*

El trabajo de laboratorio se ha realizado en varias etapas:

- 1- Alineación de las fibras monomodo de inyección/recepción de luz a los grating de entrada y salida de las guías y ajuste del polarizador, de modo que a una longitud de onda fijada en la fuente laser se obtenga la mayor potencia óptica en la fibra de recepción para la polarización escogida.
- 2- Barrido en longitud de onda de modo que se obtenga la respuesta espectral de la estructura. Los pasos 1 y 2 se realiza para cada guía de onda slot de 500nm de ancho y diferentes longitudes.
- 3- Obtención de las pérdidas de propagación a partir de los resultados de la respuesta espectral para diferentes longitudes de la guía de onda slot.

*Resultados —*

Como resultado de la investigación se ha logrado una potencia máxima de -16dB de fibra a fibra para una longitud de guía de onda de 125 $\mu$ m, al utilizar los parámetros óptimos de diseño del grating lineal y luego curvarlo, obteniéndose una mejor eficiencia que la registrada en el grating lineal de -22dB para la misma longitud de la guía y la misma longitud de onda de operación. La respuesta espectral del grating se encuentra centrada a los 1565nm con respecto a la longitud de onda de operación de diseño de 1550nm, obteniéndose

un ancho de banda de 34nm. Las pérdidas de propagación obtenidas para la guía de onda slot diseñada son de 5dB/cm y las pérdidas de acoplo del grating son de alrededor de 7dB.

*Líneas futuras* —

Realizar una nueva fabricación de gratings de modo que se puedan alcanzar los parámetros óptimos obtenidos en simulación, con la finalidad de mejorar los resultados obtenidos en caracterización.

Medir la incidencia de varios parámetros fijados al curvar los grating lineales, como la distancia focal de 36 $\mu$ m y el ángulo con el cual se superpone el taper desde el foco común en su parte estrecha sobre las elipses confocales, de manera que se optimice la estructura y se mejore la eficiencia.

*Publicaciones* —

R. A. Larrea, A. M. Gutierrez, J. Hurtado, J. M. Ramírez, B. Garrido, P. Sanchis, “Compact focusing grating couplers for silicon horizontal slot waveguides”, submitted for publication to Optics Letters.

*Abstract* —

The present investigation focuses on the vertical coupling structure optimization to allow the coupling of the fundamental propagation mode of a standard monomode fiber optic and a slot waveguide for future PICs on SOI platform. The presented work shows 2D-3D simulations of the grating coupler for its optimization. With the optimum parameters obtained in the lineal gratings simulations, it has been designed the focusing gratings. The designed structures were fabricated and its characterization study was carried out. The obtained results are 7dB of coupling efficiency with 34nm bandwidth.

Autor: Larrea Luzuriaga Roberto Alejandro email: [rolarlu@teleco.upv.es](mailto:rolarlu@teleco.upv.es)

Director 1: Sanchis Kilders Pablo email: [pabsanki@com.upv.es](mailto:pabsanki@com.upv.es)

Director 2: Gutiérrez Campo Ana María email: [angucam@teleco.upv.es](mailto:angucam@teleco.upv.es)

Fecha de entrega: 04-09-15

**ÍNDICE**

<b>I. Introducción</b> .....	<b>4</b>
I.1. Guía de onda slot .....	5
I.2. Acoplamiento a la fibra.....	6
I.3. Grating coupler .....	7
I.4. Grating en guías de onda slot.....	8
<b>II. Diseño</b> .....	<b>9</b>
II.1. Consideraciones de Diseño.....	9
II.2. Software de Diseño y Simulación .....	10
II.3. Diseño del Grating.....	11
<b>III. Simulación</b> .....	<b>12</b>
III.1. Consideraciones iniciales .....	12
III.2. Simulaciones 2D y Resultados.....	13
III.3. Análisis espectral .....	24
III.4. Taper .....	24
III.5. Simulaciones Grating Lineal 3D.....	26
III.6. Diseño de Grating Curvados a partir de parámetros óptimos grating lineales .....	27
III.7. Simulaciones Grating Curvados 3D.....	28
<b>IV. Fabricación</b> .....	<b>29</b>
IV.1. Proceso de Fabricación .....	29
IV.2. Grating Fabricado .....	29
<b>V. Caracterización</b> .....	<b>32</b>
V.1. Pruebas de acoplo.....	32
V.2. Resultados experimentales .....	33
V.3. Pérdidas de propagación.....	35
V.4. Pérdidas de acoplo.....	35
<b>Conclusiones</b> .....	<b>37</b>
<b>Agradecimientos</b> .....	<b>38</b>
<b>Referencias</b> .....	<b>38</b>

## INTRODUCCIÓN

La madurez de los procesos de fabricación y técnicas de diseño a escala nano-métrica hoy en día, permiten la implementación de nuevos sistemas compuestos de circuitos integrados fotónicos cada vez más complejos. Estos avances imponen nuevos desafíos asociados al desarrollo de estructuras eficientes que permitan establecer una vía de comunicación o interfaz entre estructuras de dimensiones sumamente diferentes como es el caso entre una fibra óptica y una guía de onda de un PIC.

En la década pasada muchas investigaciones se enfocaron en circuitos integrados fotónicos SOI (Silicon on Insulator), debido a los reducidos tamaños que se pueden conseguir y al alto contraste de índice disponible sobre este material. Sin embargo las dimensiones de las secciones transversales de los dispositivos complican la interconexión con una fibra óptica monomodo, por lo que varios esquemas han sido propuestos para contrarrestar este problema [1].

Mientras que el acoplamiento horizontal por medio de la utilización de tapers invertidos y superpuestos provee un gran ancho de banda y eficiencia, a menudo requieren un procesamiento posterior y no pueden ser testeados a nivel de oblea. Los grating couplers son una atractiva solución para ser testeados a nivel de oblea, ya que la luz se acopla fuera del plano. [2]

Por otro lado, las guías de onda slot basadas en silicio han sido propuestas actualmente por las mejoras en las no linealidades del material. El alto grado de confinamiento de la luz en el slot permite el uso de materiales ópticos activos adecuados para modulación, conmutación y otras aplicaciones. [3]

El presente estudio pretende desarrollar una estructura de acoplo eficiente (grating coupler), partiendo de una guía de onda slot basada en silicio, y cuya capa slot está compuesta de nitruro de silicio, cuyo índice de refracción es menor al de silicio, y según estudios mejora la reflectividad de la interfaz [4], por lo que en nuestro caso se prevé una mayor difracción de luz del grating a la fibra monomodo.

El diseño y optimización de la estructura se realizará, por medio de simulaciones, y la caracterización se realizará de manera posterior a la fabricación de la estructura con los parámetros de diseño óptimos simulados.

### I.1. Guías de Onda Slot

Las guías de onda slot fueron propuestas en el año 2004, por el grupo de investigación de Lipson en el centro Cornell de Nanofotónica, quienes experimentalmente demostraron que con la geometría descubierta formando una compleja nano-estructura la luz puede ser confinada dentro de una región slot de bajo índice debido a la discontinuidad de campo eléctrico. [5]

Las estructuras de guías de onda slot tienen bastante interés e importancia debido a diversas aplicaciones en nanofotónica, como el diseño de sensores ópticos. Trabajando con la polarización transversal magnética TM, la guía de onda es capaz de guiar y confinar la luz, de tal manera que se obtiene una intensidad óptica muy alta en una pequeña área de sección transversal compuesta de cualquier material con un índice de refracción lo suficientemente bajo respecto al resto de la estructura. [6]

La Fig. 1 ilustra el esquema simple de una guía de onda slot básica, donde  $n_C$ ,  $n_H$ ,  $n_S$  son los índices de refracción de cada capa, y  $a$ ,  $b$  es el ancho de la capa a lo largo del eje  $x$ .

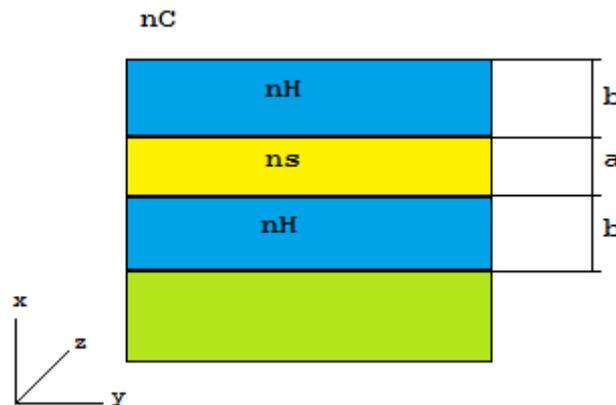


Fig.1.- Guía de onda slot.

El principio de funcionamiento se basa en la discontinuidad del campo eléctrico  $E$  en las interfaces de alto contraste de índice de refracción. Las ecuaciones de Maxwell afirman que, para satisfacer la continuidad de la componente normal de la densidad de flujo eléctrico  $D$  en una interfaz, el campo eléctrico  $E$  correspondiente debe someterse a una discontinuidad con mayor amplitud en el lado de bajo índice de refracción. Si se tiene una interfaz entre dos regiones de mayor índice de refracción, esta discontinuidad puede ser utilizada para mejorar fuertemente el confinamiento de la luz en una región nanométrica compuesta por un material de bajo índice. La solución analítica que demuestra este evento, está dada por el campo eléctrico  $E_x$ , transversal del modo fundamental TM de una guía de onda slot, y viene dado por:

$$E_x(x) = A \begin{cases} \frac{1}{n_s} \cosh(\gamma_s x), & |x| < a \\ \frac{1}{n_H} \cosh(\gamma_s a) \cos[k_H(|x| - a)] + \frac{\gamma_s}{n_s^2 k_H} \sinh[k_H(|x| - a)], & a < |x| < b \\ \frac{1}{n_c} \left\{ \cosh(\gamma_s a) \cos[k_H(|b - a|)] + \frac{n_H^2 \gamma_s}{n_s^2 k_H} \sinh(\gamma_s a) \cos[k_H(|b - a|)] \right\} \exp[-\gamma_c(|x| - b)] & |x| > b \end{cases} \quad (1)$$

donde  $k_H$  es el número de onda transversal en la capa de alto índice,  $\gamma_c$  es el coeficiente de decaimiento del campo en la cubierta,  $\gamma_s$  es el coeficiente de decaimiento del campo en el slot y  $A$  es una constante dada por:

$$A = A_0 \frac{\sqrt{k_0^2 n_H^2 - k_H^2}}{k_0} \quad (2)$$

donde  $A_0$  es una constante arbitraria, y  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  es el número de onda en el vacío.

### 1.2. Acoplamiento a la fibra

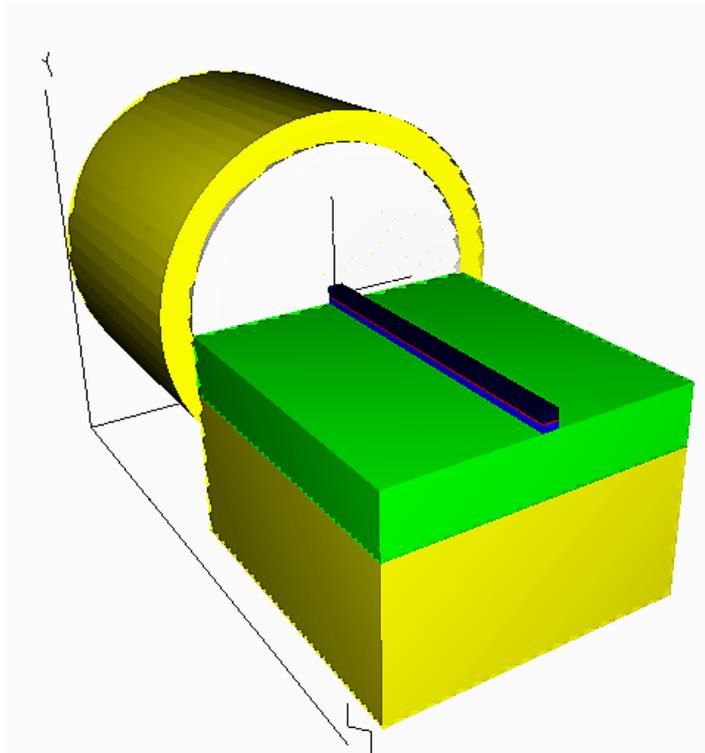


Fig.2.- Diferencia de tamaño entre una fibra óptica monomodo y una guía de onda de un PIC

El acoplamiento de circuitos nanofotónicos a una fibra monomodo resulta en un ejercicio complejo debido a la gran diferencia de tamaño de estos dos componentes, tal como se observa en la Fig. 2, lo que implica pérdidas. Por tanto es necesaria una estructura que permita generar un acoplo eficiente, reduciendo dichas pérdidas y permitiendo el paso de la luz de una estructura a la otra.

El acoplo se puede realizar de manera horizontal con la utilización de tapers, como se observa en la Fig. 3, sin embargo este esquema implica que la longitud de los tapers sea cercana a los

milímetros, para obtener un acoplo eficiente, lo que constituye un problema a nivel del tamaño total del dispositivo.

Otro esquema de acoplo se realiza de manera vertical, con la utilización de grating couplers. Con esta forma de acoplo se logra un reducido tamaño, mucho menor al del esquema horizontal. Sin embargo, la eficiencia de este método depende en gran medida de la geometría de la estructura, de sus propiedades ópticas y de un ajuste o calibración para establecer la distancia, altura y ángulo de acoplo idóneo que debe tener la fibra, para asegurar una mayor eficiencia de acoplo.

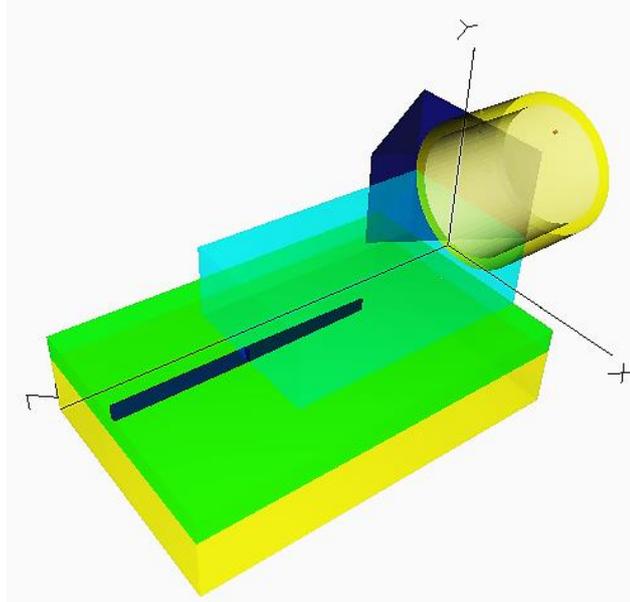


Fig.3.- Acoplamiento horizontal entre una fibra óptica monomodo y una guía de onda

### 1.3. Grating coupler

El acoplo de luz por grating utiliza el principio de la difracción de Bragg, cuyas ecuaciones permiten establecer una base para el diseño del grating. [7]

La difracción de Bragg establece que un rayo de luz incidente a una superficie de una estructura periódica será difractado, estableciendo una relación entre el vector de onda incidente y la onda difractada.

Para un primer orden de difracción, la condición de Bragg puede ser escrita por:

$$k_{in} \sin\theta + \frac{2\pi}{P} = \beta \quad (3)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_{eff} \quad (4)$$

$$k_{in} = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_{top}$$

Donde  $\beta$  es la constante de propagación del modo guiado,  $\lambda_0$  la longitud de onda deseada,  $n_{eff}$  el índice efectivo del modo fundamental,  $k_{in}$  corresponde al vector de onda de la onda incidente,  $n_{top}$  es



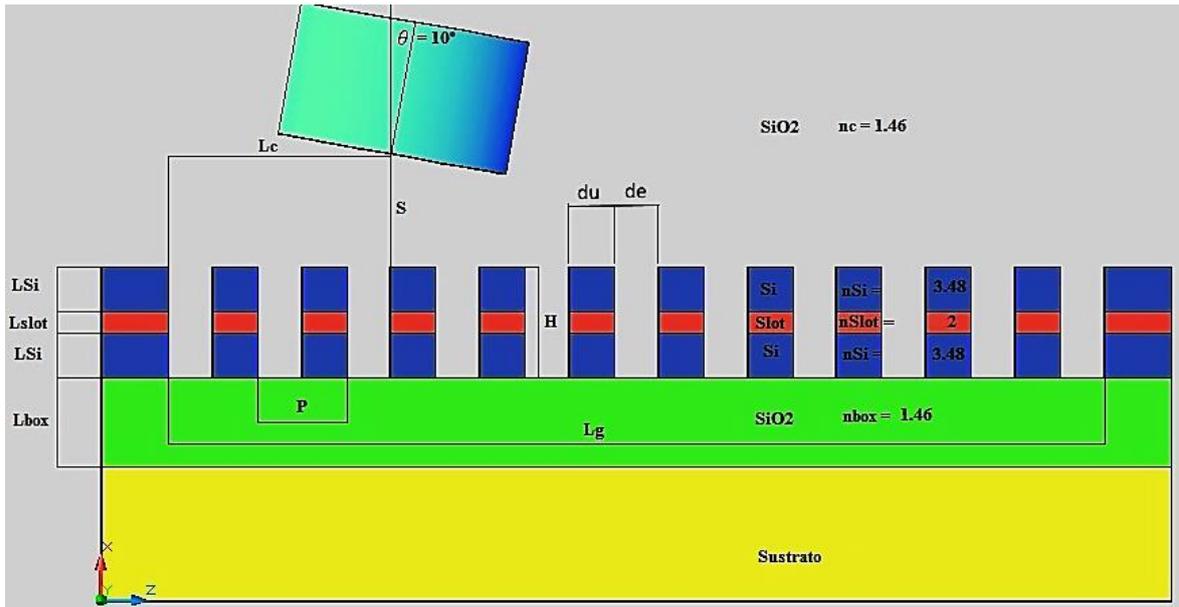


Fig. 6.- Grating bidimensional plano XZ

## II. DISEÑO

### II.1. Consideraciones de Diseño.

Para el diseño se considerará una longitud de onda de  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ , por lo cual todos los índices de refracción considerados de los diferentes materiales que constituyen la estructura corresponderán a esta longitud de onda. La guía slot está formada por dos capas de silicio (Si) de espesor  $L_{\text{Si}}$ , cuyo índice de refracción es de  $n_{\text{Si}} = 3.48$ , y una capa intermedia de nitruro de silicio ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) de espesor  $L_{\text{slot}}$ , cuyo índice de refracción es de  $n_{\text{slot}} = 2$ . El grating será fabricado a partir de una oblea de silicio comercial estándar, por lo que para las simulaciones se considerará la capa de sustrato de silicio y el Box de óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), cuyo espesor es  $L_{\text{box}} = 2 \mu\text{m}$  e índice de refracción  $n_{\text{box}} = 1.46$ . Además se considerará inicialmente una cubierta de óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) de espesor de  $1 \mu\text{m}$  e índice de refracción  $n_c = 1.46$ .

El grating a simular corresponde a un esquema fully-etched, de modo que la variable  $H$  corresponderá a la suma del espesor de las capas de la guía slot ( $L_{\text{Si}} + L_{\text{slot}} + L_{\text{Si}}$ ).

El periodo del grating  $P$ , se obtendrá a partir de la fórmula de la condición de Bragg, de orden 1 de modo que:

$$P = \frac{\lambda}{n_{\text{eff}} - n_c \sin \theta} \quad (5)$$

El filling factor  $Ff$  (factor de relleno), es un valor porcentual que permite relacionar y determinar las achuras de la parte atacada y no atacada,  $du$  y  $de$ , con respecto al periodo del grating  $P$ , de modo que:

$$\begin{aligned} du &= (1 - Ff)P \\ de &= Ff(P) \end{aligned} \quad (6)$$

El índice efectivo del grating corresponde al sumatorio de los índices efectivos correspondientes a las dos áreas que componen la guía: la parte sin atacar ( $n_u$ ) y la parte atacada ( $n_e$ ), en proporción al filling factor utilizado  $Ff$ , por lo que:

$$n_{eff} = (1 - Ff)n_u + Ff * n_e \quad (7)$$

En la Fig. 7 se puede observar los diferentes índices efectivos de las dos áreas que forman el grating.

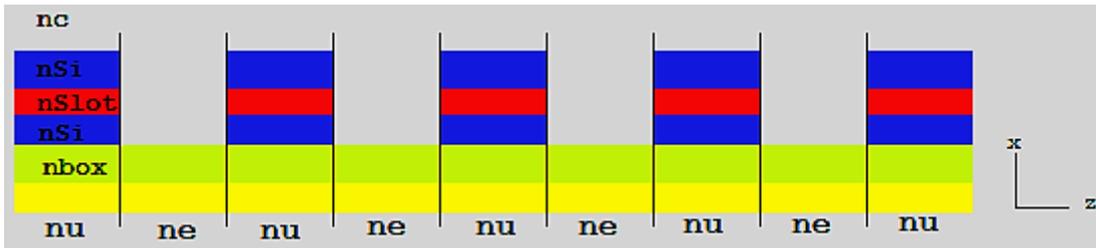


Fig. 7.- Índices efectivos de las áreas que componen la guía slot.

Para obtener la longitud total del grating  $L_g$  se ha fijado un número de periodos  $N=20$ , por tanto:

$$L_g = N * P \quad (8)$$

Con respecto a los parámetros necesarios para posicionar la fibra monomodo comercial, el grating se mantendrá inicialmente a una altura  $S = 1.5\mu\text{m}$  del núcleo de la fibra. El ángulo de incidencia  $\theta$  se fijará en un valor de  $10^\circ$ , que corresponde al ángulo que se forma entre la normal al grating y el eje central del núcleo de la fibra, debido a que el setup del laboratorio de caracterización del NTC tiene fijo dicho ángulo.

Para obtener una primera aproximación de la longitud de acoplo  $L_c$ , que determina la distancia óptima entre el inicio del grating y el núcleo de la fibra, se utilizó la expresión matemática que se basa en la geometría del grating en guías de onda SOI, dada por [8]:

$$L_c = \frac{w_0}{1.37 * \text{Cos}\theta} \quad (9)$$

Donde  $w_0$  corresponde a la mitad del diámetro del campo modal (MFD) de un haz gaussiano incidente, que es el modo fundamental de una fibra estándar monomodo. En una fibra monomodo comercial  $\text{MFD} = 10.4\mu\text{m}$ .

## II.2. Software de diseño y simulación.

Para la simulación se ha utilizado el software RSoft [9], en el cual se ha parametrizado un grating bidimensional (plano XZ), de modo que se puedan variar ciertos parámetros, con los cuales se realizará varias simulaciones que permitan determinar los valores idóneos para obtener una mayor eficiencia.

Para obtener el modo fundamental de la guía y el índice efectivo se ha utilizado las herramientas BeamPROP y FemSIM. La simulación del funcionamiento del grating se ha realizado con FullWAVE.

### II.3. Diseño del Grating.

Inicialmente, se han fijado los parámetros de diseño de la guía de onda slot, de manera simétrica donde  $L_{Si\_up}$  y  $L_{Si\_down}$  tengan el mismo ancho, y la capa  $L_{slot}$  en 50nm. Con respecto a los parámetros de diseño del grating se han fijado a partir de los siguientes datos teóricos: longitud de acoplo  $L_c$ , índice efectivo  $n_{eff}$ , y periodo  $P$ . Los parámetros filling factor  $Ff$  y distancia  $S$ , se han fijado inicialmente en un valor de 0.5 y  $1.5\mu m$  respectivamente. El valor del índice de refracción de la parte atacada no corresponderá al índice de refracción de la cubierta  $L_{cover}$  y el índice de refracción de la parte no atacada no correspondiente al índice de refracción de la guía, el cual se obtendrá por medio del software de simulación, tal como se observa en la tabla 1 y 2.

$\lambda = 1,55\mu m$	thickness [ $\mu m$ ]	Índice de refracción n
$L_{cover}$ (SiO <sub>2</sub> )	1	1.46
$L_{Si\_up}$ (Si)	0.25	3.48
$L_{slot}$ (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> )	0.05	2
$L_{Si\_down}$ (Si)	0.25	3.48
$L_{box}$ (SiO <sub>2</sub> )	2	1.46

Tabla 1: Parámetros Guía de Onda slot

H [ $\mu m$ ]	$\theta$	S [ $\mu m$ ]	$L_c$ [ $\mu m$ ] (9)	Ff	nu	ne	$n_{eff}$ (7)	P [ $\mu m$ ] (5)	du [ $\mu m$ ] (6)	de [ $\mu m$ ] (6)	Lg [ $\mu m$ ] (8)
0.550	10°	1.5	3.85	0.5	2.92	1.46	2.19	0.801	0.400	0.400	0.160

Tabla 2: Parámetros de diseño grating

En la Fig. 8 se ilustra el CAD implementado y parametrizado.

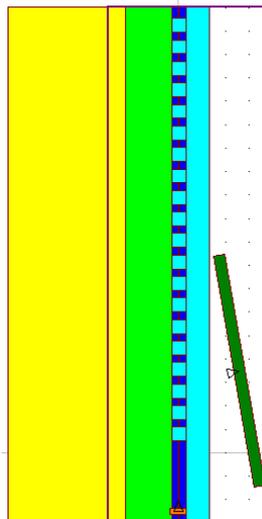


Fig. 8.- Modelo de Simulación Grating de Salida.

El perfil de índices del modelo de simulación implementado se puede observar en la Fig. 9.

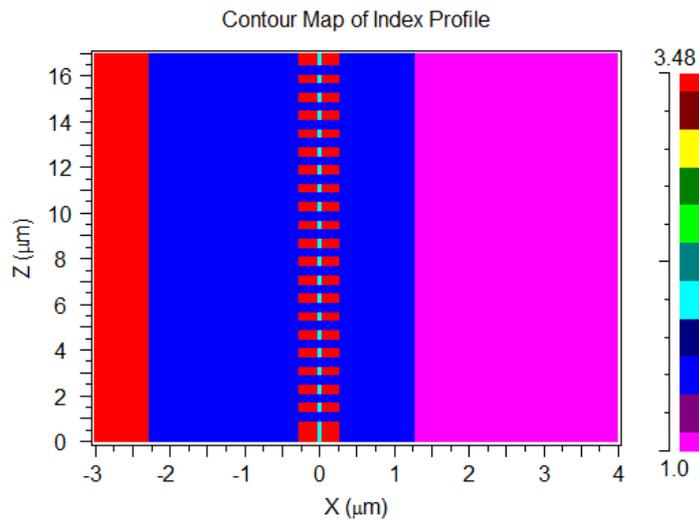


Fig. 9.- Perfil de índices modelo de simulación implementado.

### III. SIMULACIÓN

#### III.1. Consideraciones iniciales

Con los parámetros iniciales se realizó la simulación del grating en configuración de salida, es decir, acoplo de la luz de la guía a la fibra. Por reciprocidad los resultados obtenidos en esta configuración serán los mismos para el esquema de entrada, es decir, acoplo de luz de la fibra a la guía.

Para obtener el valor de  $n_u$ , parte sin atacar, que corresponde al índice efectivo de la de la guía de onda slot, se ha utilizado la herramienta de simulación BeamPROP. El modo fundamental TM, se ilustra en la Fig. 10.

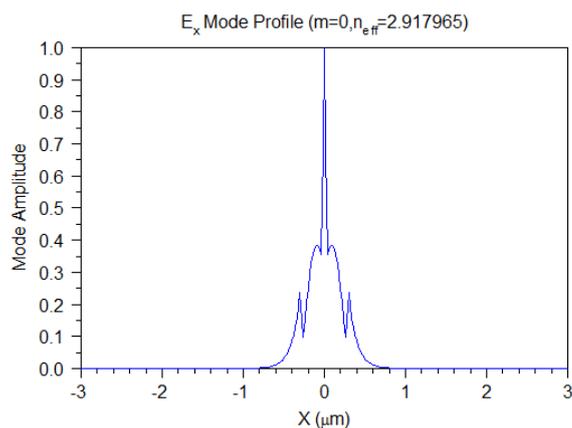


Fig. 10.- Modo fundamental TM.

Como se puede observar existe un confinamiento mayor de luz en la capa slot de 50nm y el índice efectivo para la geometría de esta estructura es de 2.917965.

La Fig. 11 muestra el modo fundamental del modo TE. En este caso se observa que no hay confinamiento del haz de luz en la capa slot sino que se propaga por toda la guía, el índice efectivo para este modo es de 3.159439.

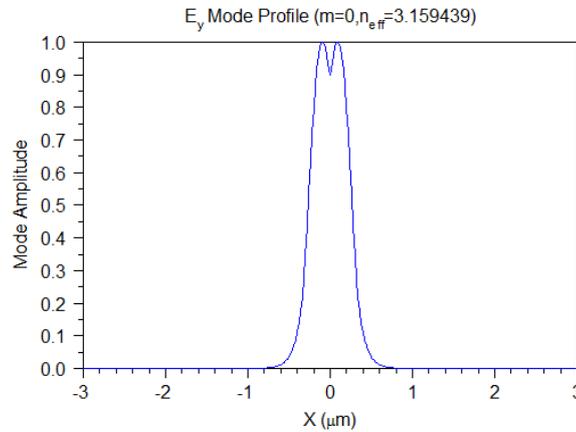


Fig. 11.- Modo fundamental TE.

Comparando el modo fundamental de ambas polarizaciones, se puede observar una mayor intensidad de propagación en el modo TM, como era de esperar, debido al efecto slot.

En cada simulación se ha obtenido la eficiencia de la estructura, como la cantidad de luz que sale del grating y se acopla al modo fundamental de la fibra, que en nuestro caso corresponden a una fibra monomodo comercial cuyo modo fundamental se muestra en Fig. 12.

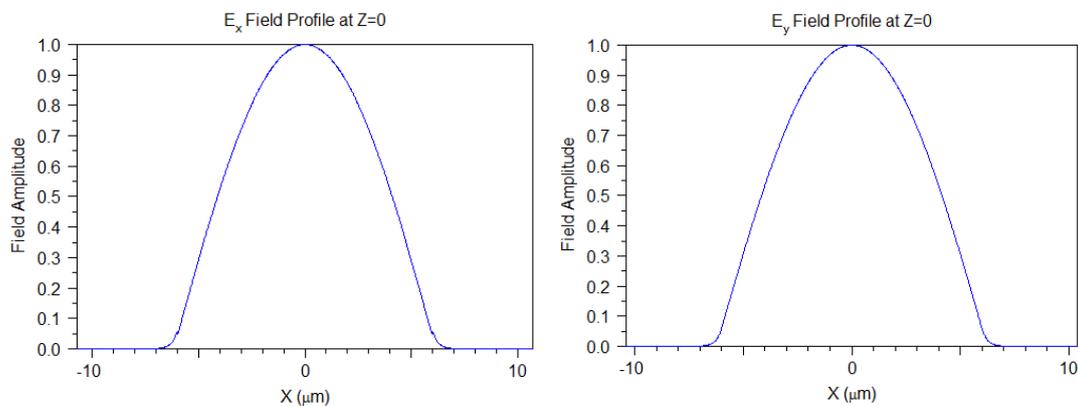


Fig.12.- Modo fibra óptica comercial monomodo, polarización TE y TM

### III.2. Simulaciones 2D y Resultados

De manera inicial se realizó un barrido de simulaciones manteniendo constante el espesor de las capas y variando otros parámetros como  $L_c$  (2 a 5  $\mu\text{m}$ ) y  $F_f$  (0.25 a 0.75). Se ha fijado  $S$  de manera arbitraria en 1.5  $\mu\text{m}$ , así se puede obtener una primera aproximación de eficiencia de la estructura y determinar qué parámetro, de los dos que se varió, incide en mayor proporción.

En la Fig. 13, se observa los resultados de las simulaciones. Se ha obtenido una mayor eficiencia del 22.84% con los parámetros  $L_c= 2.5\mu\text{m}$ ,  $S= 1.5\mu\text{m}$  y  $F_f= 65\%$ . En este conjunto de

simulaciones se observa que el parámetro que incide en mayor grado sobre la eficiencia de acoplamiento es el Ff, ya que dependiendo de la relación entre la parte atacada y no atacada que componen la red de difracción o grating se observa una mayor excitación de modos guiados fuera del plano. El valor de la longitud de acoplo Lc, aumenta o disminuye la eficiencia de acoplamiento dependiendo de la concentración de modos guiados fuera del plano.

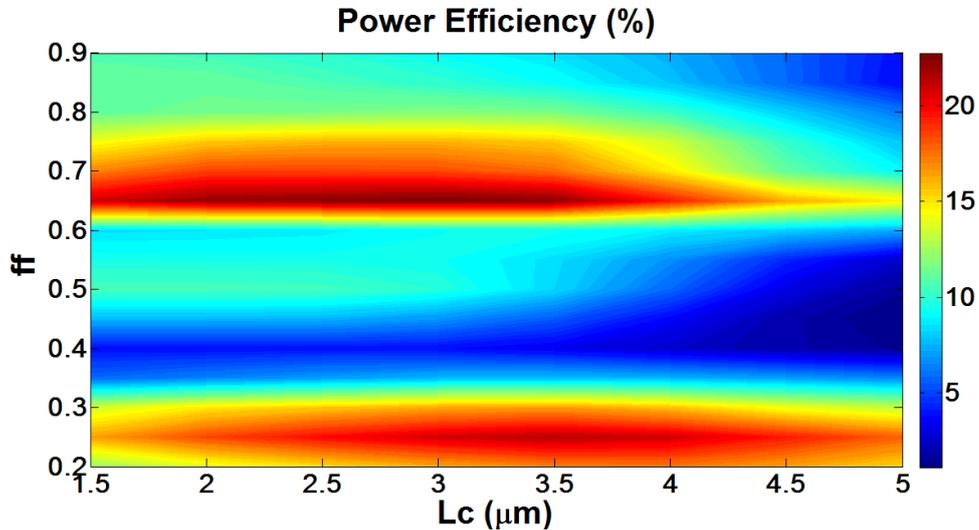


Fig. 13.- Variación parámetros Ff y Lc

Los valores del índice efectivo  $n_{\text{eff}}$  y del periodo P han sido calculados de manera teórica, al variar el Ff varía también el índice efectivo  $n_{\text{eff}}$  y a su vez el periodo P, por la relación existente entre estas tres variables, tal como se ilustra en Fig. 14.

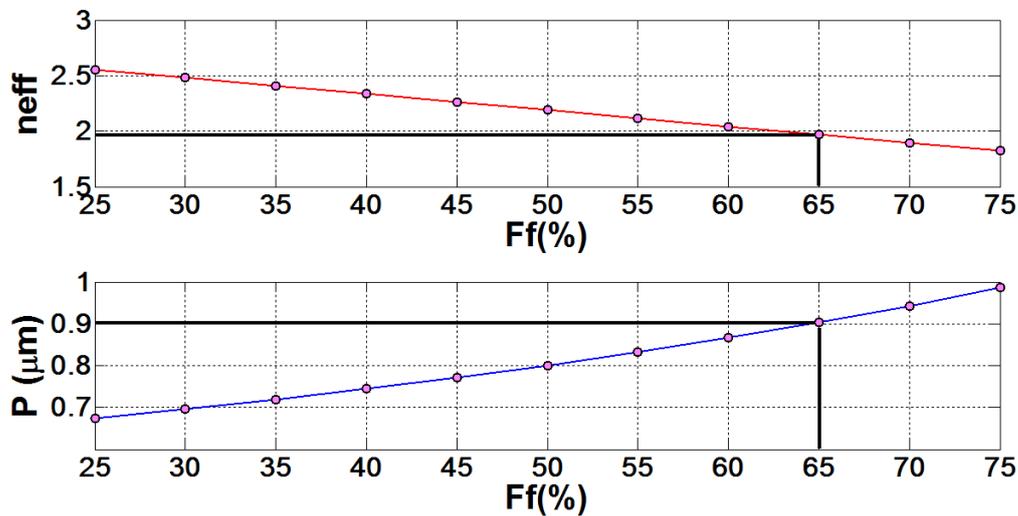


Fig. 14.- Variación teórica  $n_{\text{eff}}$  y P en función Ff.

Para el valor  $Ff=0.65$  con el que se obtiene mayor eficiencia, se han obtenido de manera teórica los parámetros  $n_{\text{eff}} = 1.9703$  y  $P = 0.903 \mu\text{m}$ . Sin embargo el periodo P del grating es un parámetro que puede ser optimizado, por lo que fijando los parámetros anteriormente simulados  $Lc = 2.5 \mu\text{m}$ ,  $S = 1.5 \mu\text{m}$  y  $Ff = 0.65$ , se hizo un nuevo barrido de simulaciones variando el periodo P ( $0.6 - 1 \mu\text{m}$ ), tal como se muestra en la Fig. 15.

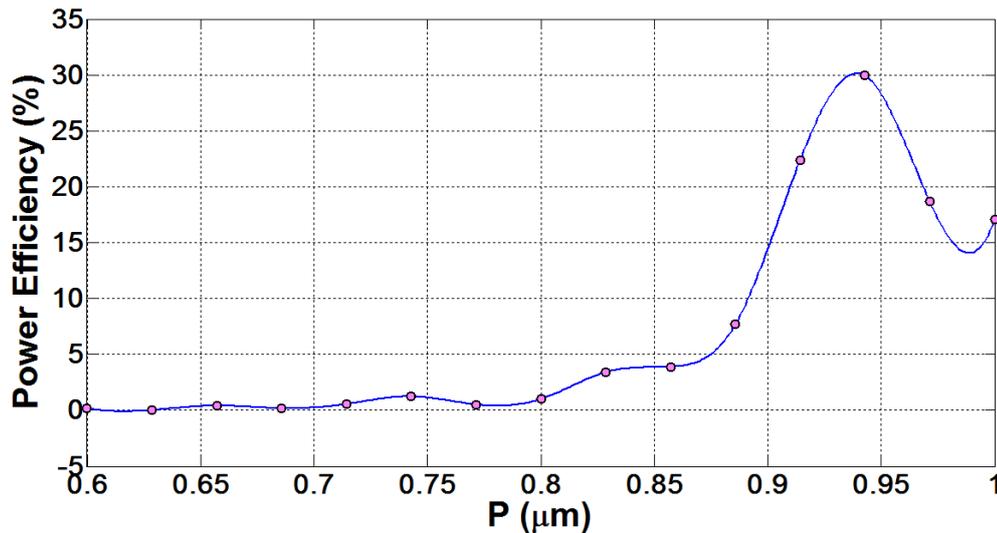


Fig.15.- Eficiencia en función de la variación del periodo P

Con la variación del periodo P, se puede observar que se ha obtenido un incremento significativo a nivel de eficiencia de acoplo. Con el valor óptimo de  $P=0.943 \mu\text{m}$ , (nótese que es un valor en el rango del obtenido teóricamente), la eficiencia obtenida es de 29.76%, frente a los 22.84% obtenidos anteriormente.

Para comprobar el valor del periodo óptimo,  $P=0.943\mu\text{m}$ , obtenido se han re-simulado individualmente los parámetros Ff, Lc y S.

La Fig. 16, muestra la variación del Ff, fijando los valores  $Lc=2.5\mu\text{m}$ ,  $S= 1.5\mu\text{m}$  y  $P = 0.943\mu\text{m}$ , donde se obtiene una eficiencia máxima de 30.99% para un  $Ff=0.65$ .

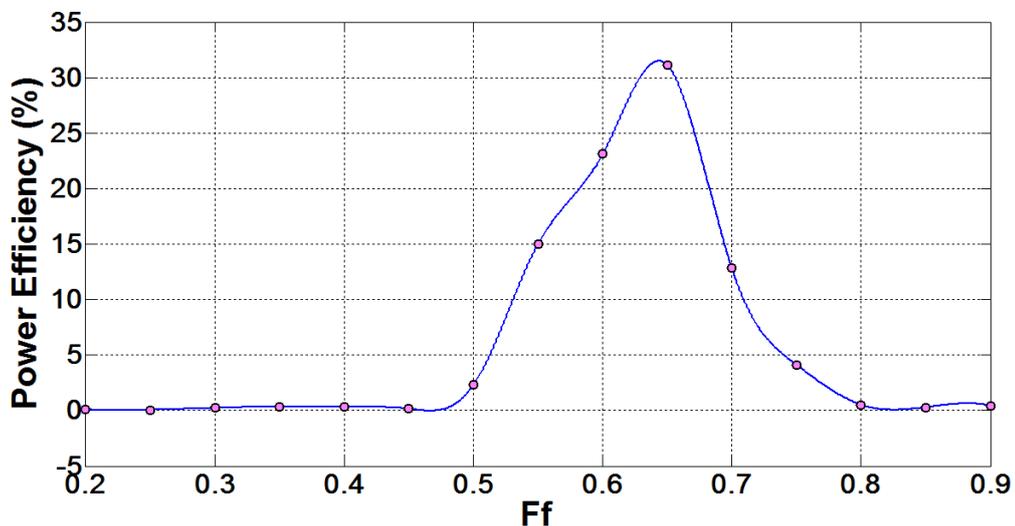


Fig.16.- Eficiencia en función de la variación del Ff

La Fig. 17, muestra la variación de Lc, fijando los valores  $Ff=0.65$ ,  $S= 1.5\mu\text{m}$  y  $P = 0.943\mu\text{m}$ , donde se obtiene una eficiencia máxima de 30.99% para un  $Lc=2.5\mu\text{m}$ .

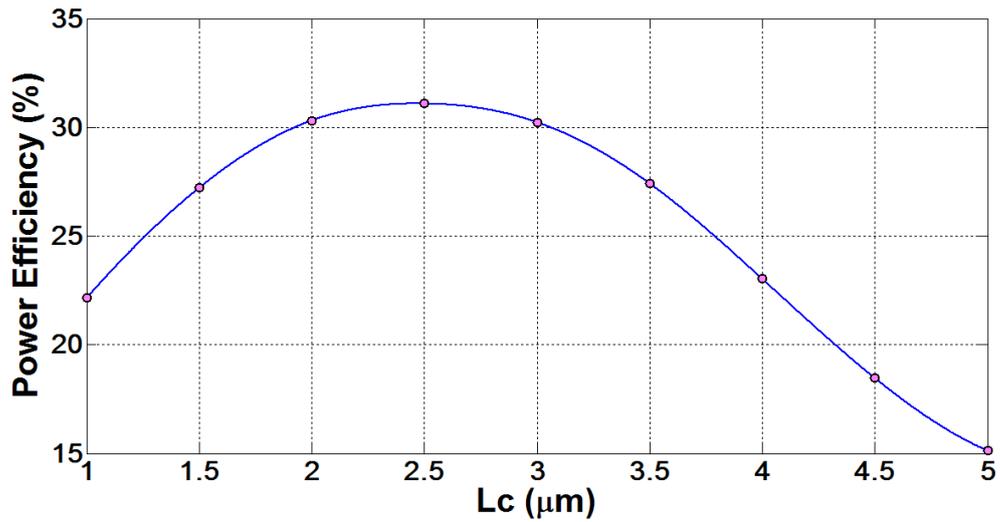


Fig.17.- Eficiencia en función de la variación de Lc.

La Fig. 18, muestra la variación de S, fijando los valores Ff=0.65, Lc= 2.5μm y P = 0.943μm, donde se obtiene una eficiencia máxima de 31.05% para un S=0.5μm. Como se puede observar la variación de este parámetro no es tan significativa por lo que se mantendrá el valor de S= 1μm.

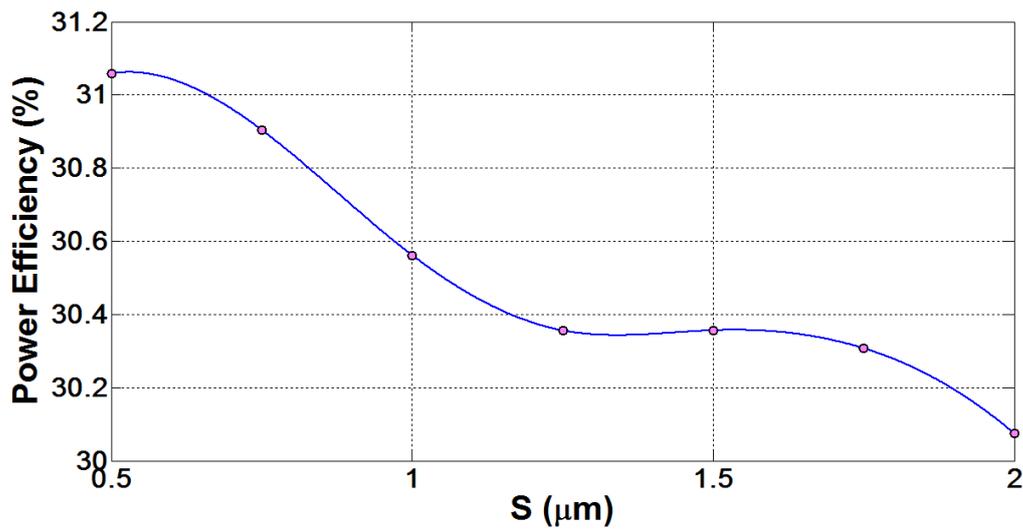


Fig.18.- Eficiencia en función de la variación de S.

En las tablas 3 y 4 se resumen los valores resultantes de las simulaciones realizadas para el diseño del grating, sobre los parámetros de diseño de la guía de onda slot descrita en la tabla 1, y se compara la eficiencia obtenida entre el periodo teórico P(T) y el periodo optimizado P(S).

H [μm]	$\theta$	S [μm]	Lc [μm]	Ff [%]	nu	Ne	$n_{eff}$ (7)
0.550	10°	1	2.5	0.65	2.917965	1.46	1.9703

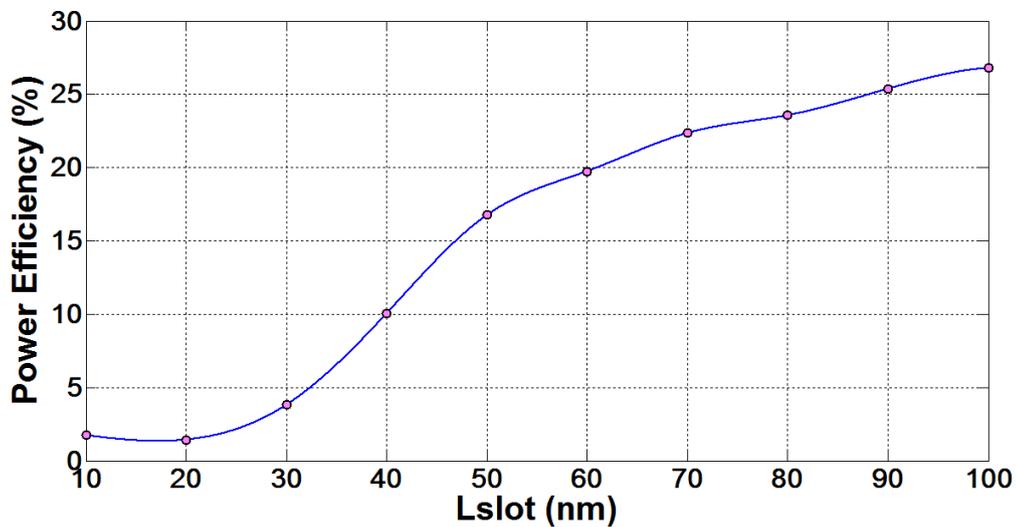
Tabla 3: Parámetros de diseño del grating.

		<b>du [<math>\mu\text{m}</math>] (6)</b>	<b>de [<math>\mu\text{m}</math>] (6)</b>	<b>Lg [<math>\mu\text{m}</math>] (8)</b>	<b>Eff [%]</b>
<b>P(T) [<math>\mu\text{m}</math>] (5)</b>	0.903	0.316	0.587	18.057	22.49%
<b>P(S) [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	0.943	0.330	0.613	18.860	30.89%

Tabla 4: Parámetros de diseño y eficiencia obtenidos.

Como parte del diseño y optimización de la estructura, se variaron los parámetros correspondientes al espesor de las capas de la guía slot, de modo que se pueda optimizar la eficiencia de la estructura. En un primera etapa se hizo una variación del espesor de la capa slot  $L_{\text{slot}}$ , de modo que se pueda observar el grado de incidencia de este parámetro en el diseño.

Para las simulaciones se ha variado la capa  $L_{\text{slot}}$  de 10 – 100 nm, manteniendo los parámetros  $Ff=0.65$ ,  $L_c=2.5\mu\text{m}$ ,  $S=1\mu\text{m}$  y  $L_{\text{Si}_{\text{up}}}$ ,  $L_{\text{Si}_{\text{down}}}=250\text{nm}$ . Además para cada  $L_{\text{slot}}$  se ha calculado previamente el índice efectivo ( $n_u$ ) de la parte sin atacar y el modo fundamental TM ya que estos parámetros cambian al variar la geometría de la guía slot. Por tanto, los parámetros índice efectivo  $n_{\text{eff}}$  y periodo P corresponderán a los valores teóricos calculados en cada paso de la simulación. En la Fig. 19 se muestra los resultados de la eficiencia en función del espesor de la capa slot  $L_{\text{slot}}$ . Como se puede observar, no se ha obtenido una mejora de eficiencia con respecto a los resultados obtenidos anteriormente en los cuales el espesor de la capa  $L_{\text{slot}}$  se fijó en 50nm.

Fig.19.- Eficiencia en función de la variación de  $L_{\text{slot}}$ .

En la Fig. 20 se puede observar la variación del índice efectivo  $n_{\text{eff}}$  y el periodo P, obtenido de manera teórica. Al incrementar el espesor del slot, el índice efectivo  $n_{\text{eff}}$  disminuye y el periodo P se incrementa. Para un valor de  $L_{\text{slot}} = 100\text{nm}$  el periodo alcanzado es de  $P=0.9273\mu\text{m}$ , el valor óptimo simulado anteriormente era de  $P=0.943\mu\text{m}$ , lo que explica el incremento de la eficiencia al incrementar el espesor del slot.

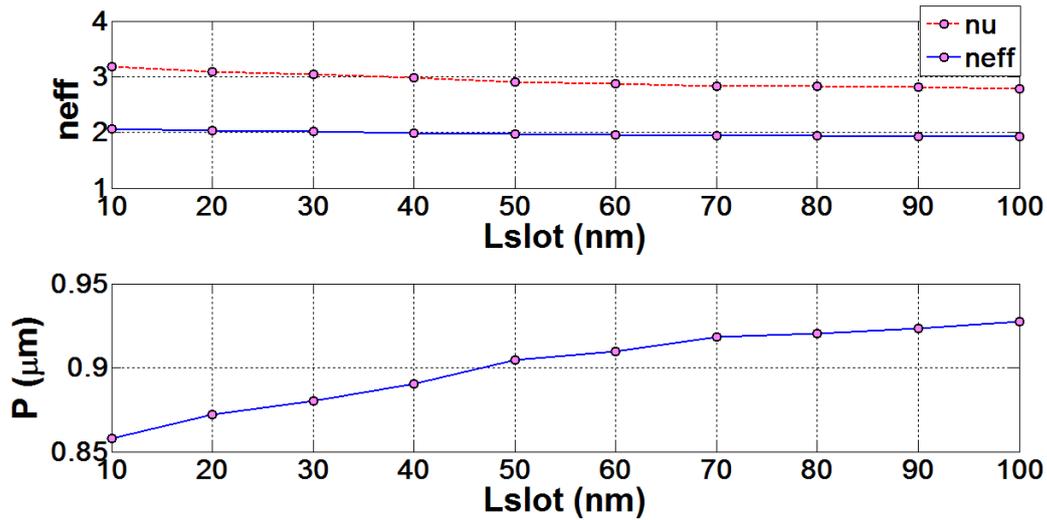


Fig.20.- Variación teórica  $n_{\text{eff}}$  y  $P$  en función de la variación del espesor  $L_{\text{slot}}$ .

Para obtener el valor óptimo del periodo  $P$ , se ha hecho un nuevo barrido, variando el espesor de la capa slot  $L_{\text{slot}}$  y el periodo  $P$  de  $0.6$  a  $1 \mu\text{m}$ . Los resultados se muestran en la Fig. 21, como se puede observar, la máxima eficiencia de  $32.97\%$ , se obtiene para un periodo  $P=0.9432\mu\text{m}$  y espesor de  $L_{\text{slot}}$  de  $60\text{nm}$ .

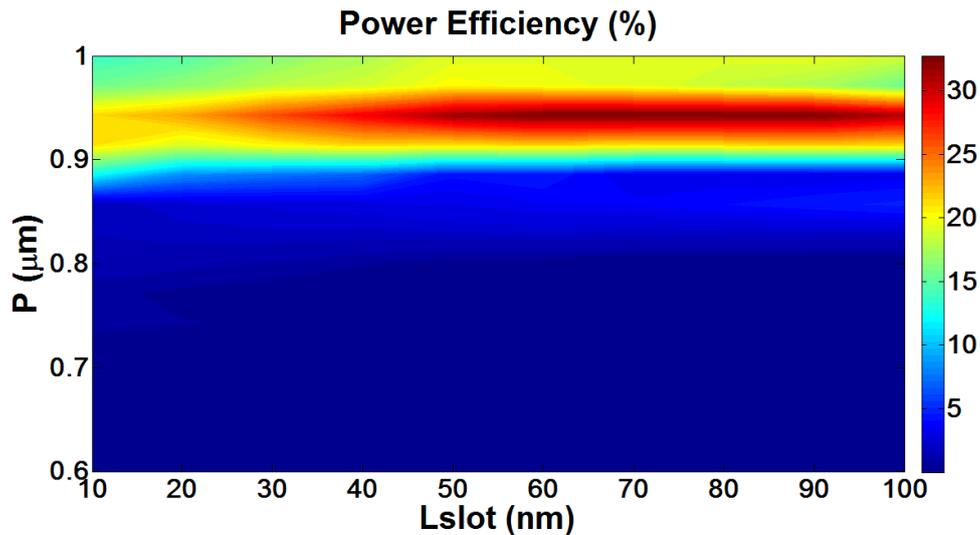


Fig.21.- Eficiencia en función de la variación del espesor  $L_{\text{slot}}$  y del periodo  $P$ .

Como se puede observar el valor del periodo  $P$  obtenido por simulación es similar al valor optimizado  $P=0.943$  obtenido anteriormente, sin embargo la eficiencia obtenida solo es ligeramente mayor a los  $30.89\%$  obtenidos cuando se fijó la capa  $L_{\text{slot}}=50\text{nm}$ . Por lo cual se puede intuir que el parámetro  $L_{\text{slot}}$  tiene una incidencia menor en la optimización de la estructura.

En las tablas 5 y 6 se resumen los valores resultantes de las simulaciones realizadas para el diseño del grating, fijando un espesor de la guía slot  $L_{\text{Si\_up}}$  y  $L_{\text{Si\_down}}=250\text{nm}$  y  $L_{\text{slot}}=60\text{nm}$ , y se compara la eficiencia obtenida entre el periodo teórico  $P(T)$  y el periodo optimizado  $P(S)$ .

H [ $\mu\text{m}$ ]	$\theta$	S [ $\mu\text{m}$ ]	Lc [ $\mu\text{m}$ ]	Ff [%]	nu	ne	$n_{\text{eff}}$ (7)
0.560	10°	1	2.5	0.65	2.880713	1.46	1.957

Tabla 5: Parámetros de diseño del grating fijando  $L_{\text{Si}}=250\text{nm}$  y  $L_{\text{slot}}=60\text{nm}$ .

	du [ $\mu\text{m}$ ] (6)	de [ $\mu\text{m}$ ] (6)	Lg [ $\mu\text{m}$ ] (8)	Eff [%]
P(T) [ $\mu\text{m}$ ] (5)	0.910	0.318	0.591	18.195
P(S) [ $\mu\text{m}$ ]	0.9432	0.330	0.613	18.864

Tabla 6: Parámetros de diseño y eficiencia obtenidos.

En una segunda etapa se ha realizado la variación del espesor de las capas de silicio  $L_{\text{Si}_{\text{up}}}$  y  $L_{\text{Si}_{\text{down}}}$  de la guía slot, de manera simétrica es decir tanto la capa inferior a la capa slot como la capa superior. La variación de las capas de silicio  $L_{\text{Si}_{\text{up}}}$  y  $L_{\text{Si}_{\text{down}}}$  a simular es de 150 a 400 nm, manteniendo fijo los parámetros  $Ff=0.65$ ,  $Lc=2.5\mu\text{m}$ ,  $S=1\mu\text{m}$  y  $L_{\text{slot}}=50\text{nm}$ . Además para cada simulación se ha calculado previamente el índice efectivo (nu) de la guía slot y el modo fundamental. Los parámetros índice efectivo  $n_{\text{eff}}$  y periodo P corresponderán a valores teóricos calculados en cada simulación. La Fig. 22 ilustra la máxima eficiencia obtenida variando el espesor de la capa  $L_{\text{Si}}$ , obteniéndose un máximo de eficiencia de 30.67% para un  $L_{\text{Si}_{\text{up}}}$  y  $L_{\text{Si}_{\text{down}}} = 280\text{nm}$ .

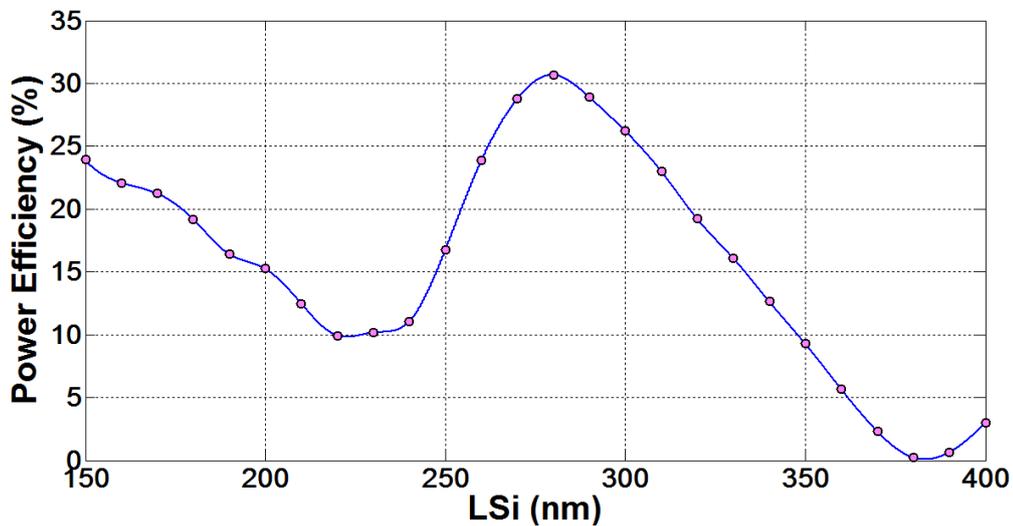


Fig.22.- Eficiencia en función de la variación del espesor  $L_{\text{Si}_{\text{up}}}$  y  $L_{\text{Si}_{\text{down}}}$ .

En la Fig. 23, se muestra la variación de los datos teóricos obtenidos de índice efectivo  $n_{\text{eff}}$  y periodo P, donde se observa que al incrementar el espesor de las capas  $L_{\text{Si}_{\text{up}}}$  y  $L_{\text{Si}_{\text{down}}}$ , el índice efectivo  $n_{\text{eff}}$  aumenta y el periodo P disminuye. El índice efectivo  $n_{\text{eff}}$  y periodo P valores teóricos para el valor de  $L_{\text{Si}}$  óptimo son de  $n_{\text{eff}}= 1.9943$  y  $P= 0.89041\mu\text{m}$ .

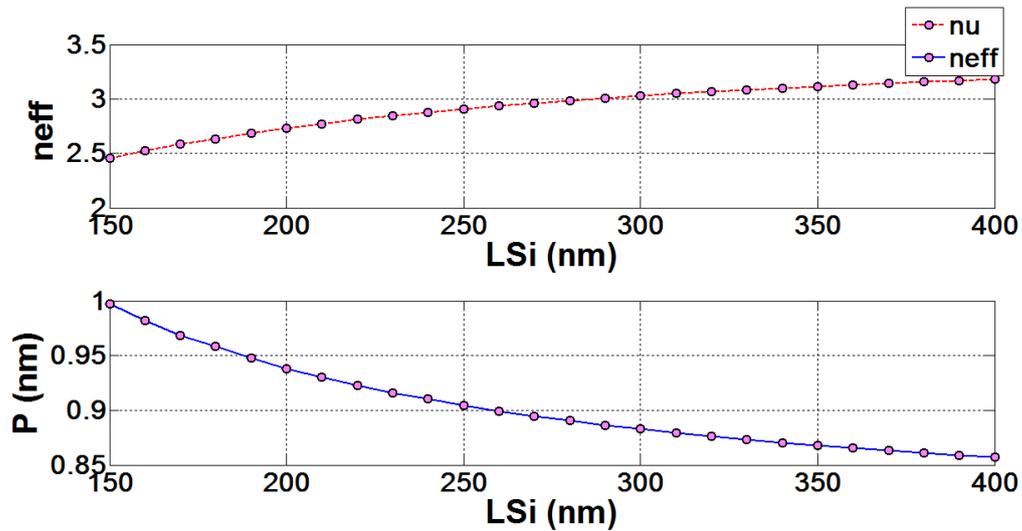


Fig.23.- Variación teórica de  $n_{eff}$  y P en función de la variación del espesor  $L_{Si\_up}$  y  $L_{Si\_down}$ .

Como el periodo P, es un parámetro que puede ser optimizado partiendo del dato teórico obtenido con el cual se alcanzó la máxima eficiencia, se realiza un nuevo barrido de simulaciones donde se hace una variación del periodo P de 0.85 a 0.95  $\mu\text{m}$  y se mantienen fijos  $Ff=0.65$ ,  $L_c=2.5\mu\text{m}$  y  $S=1\mu\text{m}$ . En la Fig. 24, se muestra la máxima eficiencia obtenida, de 37.57%, para un periodo óptimo calculado  $P=0.929\mu\text{m}$  y un espesor de la capas de silicio  $L_{Si\_up}$  y  $L_{Si\_down}=270\text{nm}$ .

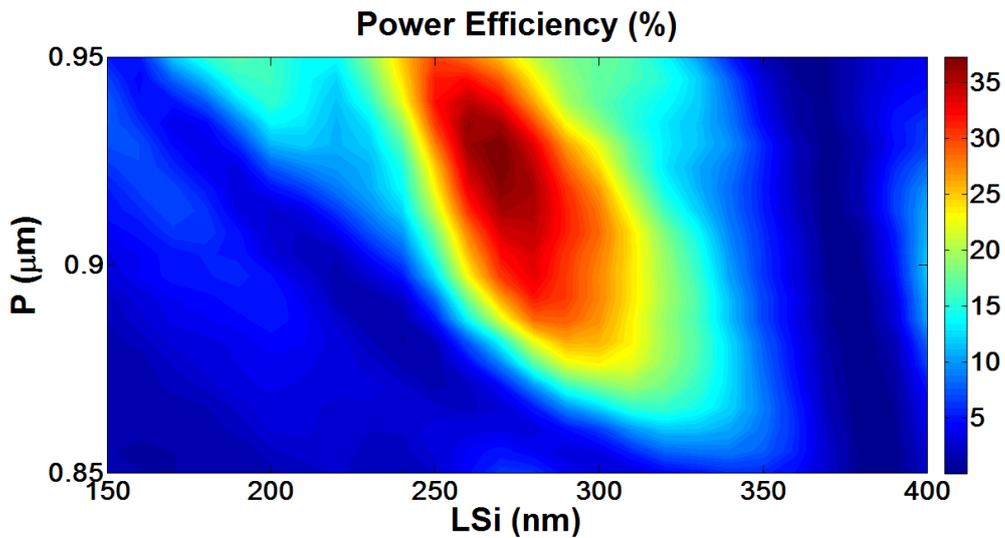


Fig.24.- Eficiencia en función de la variación del espesor  $L_{Si\_up}$  y  $L_{Si\_down}$  y del periodo P.

En las tablas 7 y 8 se resumen los valores resultantes de las simulaciones, fijando el espesor de las capas  $L_{Si\_up}$ ,  $L_{Si\_down}=270\text{nm}$  y  $L_{slot}=50\text{nm}$ , y se compara la eficiencia obtenida entre el periodo teórico  $P(T)$  y el periodo optimizado  $P(S)$ .

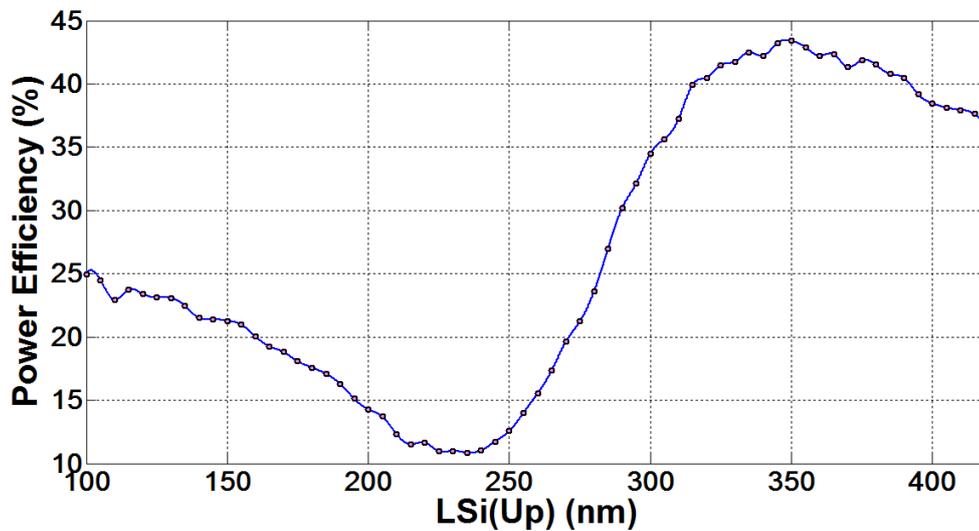
H [ $\mu\text{m}$ ]	$\theta$	S [ $\mu\text{m}$ ]	Lc [ $\mu\text{m}$ ]	Ff [%]	nu	ne	$n_{eff}$ (7)
0.610	$10^\circ$	1	2.5	0.65	2.962032028	1.46	1.9857

Tabla 7: Parámetros de diseño del grating fijando  $L_{Si\_up}$  y  $L_{Si\_down}=270\text{nm}$  y  $L_{slot}=50\text{nm}$ .

		<b>du [<math>\mu\text{m}</math>]</b> <b>(6)</b>	<b>de [<math>\mu\text{m}</math>]</b> <b>(6)</b>	<b>Lg [<math>\mu\text{m}</math>]</b> <b>(8)</b>	<b>Eff [%]</b>
<b>P(T) [<math>\mu\text{m}</math>]</b> <b>(5)</b>	0.894	0.313	0.582	17.89	28.78
<b>P(S) [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	0.929	0.325	0.604	18.58	37.44

Tabla 8: Parámetros de diseño y eficiencia obtenidos.

En una tercera etapa se ha considerado realizar la variación de la capa superior de silicio  $L_{\text{Si}_{\text{up}}}$  de la guía slot manteniendo un valor fijo para la capa inferior de silicio  $L_{\text{Si}_{\text{down}}} = 220\text{nm}$ , dado que en el proceso de fabricación se utilizará una oblea de silicio comercial cuyo espesor corresponde al valor fijado, sobre esta capa se crearan las demás capas ( $L_{\text{slot}}$  y  $L_{\text{Si}_{\text{up}}}$ ) para conformar la guía slot. Para simular la capa de silicio  $L_{\text{Si}_{\text{up}}}$  en un nivel superior a la capa slot  $L_{\text{slot}}$ , se hizo una variación de 100 a 420 nm en incrementos de 50nm, mantenido fijos los parámetros  $F_f=0.65$ ,  $L_c=2.5\mu\text{m}$ ,  $S=1\mu\text{m}$  y  $L_{\text{slot}}=50\text{nm}$ . Además para cada simulación se ha calculado previamente el índice efectivo ( $n_u$ ) de la guía de onda slot y el modo fundamental TM, y los parámetros índice efectivo  $n_{\text{eff}}$  y periodo  $P$  corresponden a valores teóricos calculados en cada simulación. En la Fig. 25 se observa la máxima eficiencia obtenida de 43.4% para un espesor de la capa superior de silicio  $L_{\text{Si}_{\text{up}}}=350\text{nm}$ , con el índice efectivo  $n_{\text{eff}}=2.003$  y el periodo  $P=0.8859\mu\text{m}$ .

Fig.25.- Eficiencia en función de la variación de la capa superior  $L_{\text{Si}_{\text{up}}}$ .

En la Fig. 26, se muestra la variación de los datos teóricos obtenidos de índice efectivo  $n_{\text{eff}}$  y periodo  $P$ , donde se observa que al incrementar el espesor de la capa superior  $L_{\text{Si}_{\text{up}}}$ , el índice efectivo  $n_{\text{eff}}$  aumenta y el periodo  $P$  disminuye.

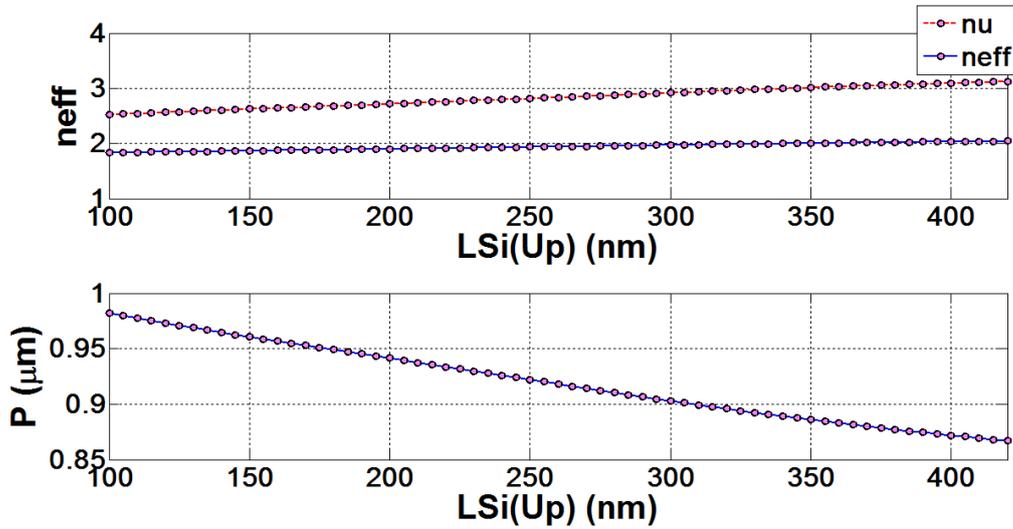


Fig.26.- Variación teórica de  $n_{\text{eff}}$  y  $P$  en función de la variación de la capa superior  $L_{\text{Si}_{\text{up}}}$ .

Al hacer una variación del parámetro periodo  $P$  se puede optimizar la eficiencia, de modo que se hizo un nuevo barrido de simulaciones donde  $P$  se hizo variar de  $0.85$  a  $0.95 \mu\text{m}$  con incrementos de  $0.005263 \mu\text{m}$ , fijando  $Ff=0.65$ ,  $L_c=2.5 \mu\text{m}$  y  $S=1$ . En la Fig. 27 se puede observar la eficiencia en función del periodo  $P$  y del espesor de la capa superior de silicio  $L_{\text{Si}_{\text{up}}}$ . Se ha obtenido una eficiencia de  $44.95\%$ , con un espesor de la capa superior de silicio  $L_{\text{Si}_{\text{up}}}=320\text{nm}$  y un periodo  $P=0.91842\mu\text{m}$ .

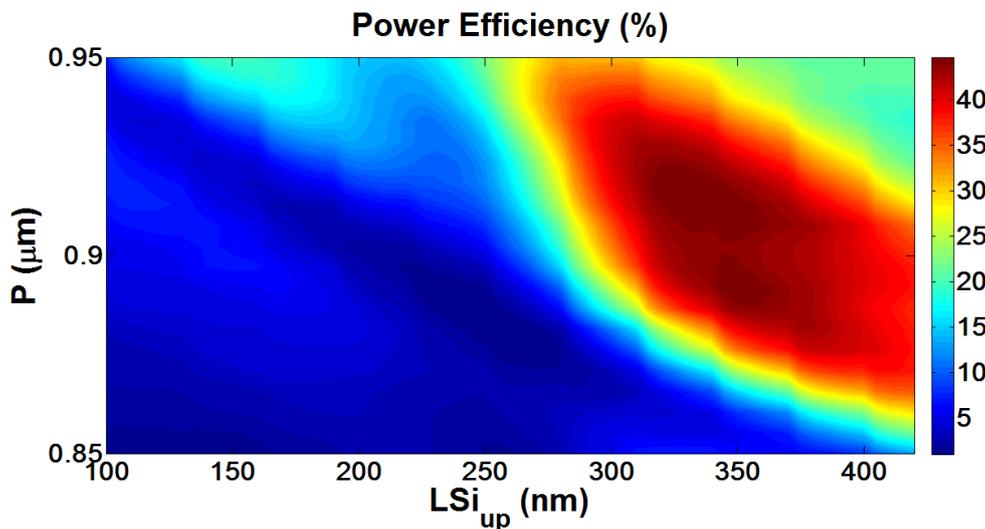


Fig.27.- Eficiencia en función de la variación de la capa superior  $L_{\text{Si}_{\text{up}}}$  y del periodo  $P$ .

En las tablas 9 y 10 se resumen los valores resultantes de las simulaciones realizadas, fijando un espesor de la guía slot  $L_{\text{Si}_{\text{up}}}=320\text{nm}$ ,  $L_{\text{slot}}=50\text{nm}$  y  $L_{\text{Si}_{\text{down}}}=220\text{nm}$ , y se compara la eficiencia obtenida entre el periodo teórico  $P(T)$  y el periodo optimizado  $P(S)$ .

H [ $\mu\text{m}$ ]	$\theta$	S [ $\mu\text{m}$ ]	Lc [ $\mu\text{m}$ ]	Ff [%]	nu	ne	$n_{\text{eff}}$ (7)
0,590	10°	1	2.5	0.65	2.956733942	1.46	1.9839

Tabla 9: Parámetros de diseño grating fijando  $L_{\text{Si\_up}}=220\text{nm}$ ,  $L_{\text{Si\_down}}=320\text{nm}$  y  $L_{\text{slot}}=50\text{nm}$

	$du$ [ $\mu\text{m}$ ] (6)	$de$ [ $\mu\text{m}$ ] (6)	$Lg$ [ $\mu\text{m}$ ] (8)	Eff [%]
P(T) [ $\mu\text{m}$ ] (5)	0.896	0.314	17.91	40.5
P(S) [ $\mu\text{m}$ ]	0.918	0.321	18.36	45.05

Tabla 10: Parámetros de diseño y eficiencia obtenida

La mayor eficiencia de acoplo, del grating diseñado y optimizado es de 45%. Dicho valor se ha obtenido variando el espesor de la capa superior de silicio de la guía slot, manteniendo un valor fijo en capa inferior de silicio, cuyo valor corresponde al espesor de la capa de silicio de una oblea comercial de 220nm, y fijando la capa slot en un valor de 50nm de espesor. Los parámetros de diseño optimizados se ilustran en la Fig. 28.

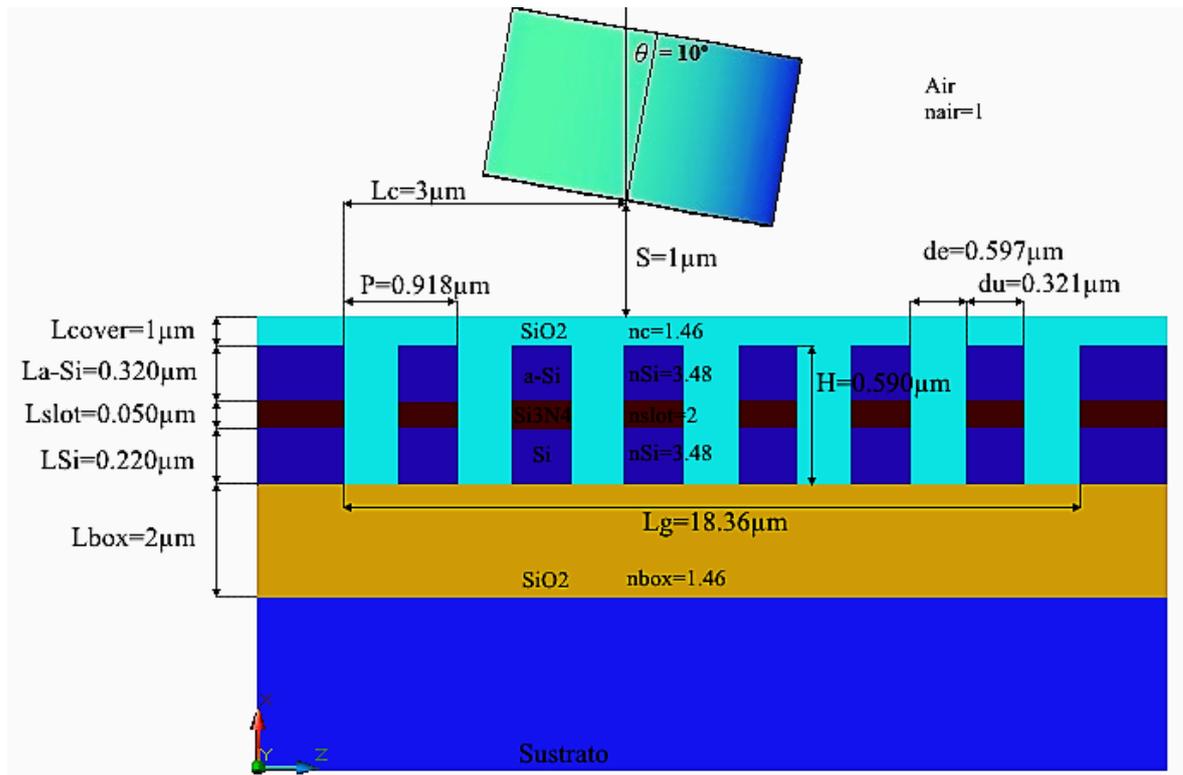


Fig.28.- Parámetros de diseño del grating optimizado.

Con los parámetros optimizados, se simuló el acoplo de entrada, de la fibra monomodo al grating, obteniéndose una eficiencia de acoplo de 44.92%. Tal como se esperaba el diseño del grating optimizado es válido en ambos sentidos. En la Fig. 29 se ilustra el CAD del grating de entrada simulado.

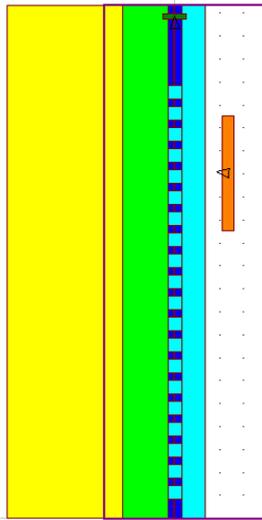


Fig.29.- Modelo de Simulación Grating de entrada.

### III.3. Análisis espectral

Después de haber obtenido la máxima eficiencia de acoplo, y fijar los parámetros óptimos para el diseño del grating como se ilustra en la Fig.28, es necesario realizar un análisis espectral de la estructura y determinar el ancho de banda que soporta habiendo fijado en su diseño su funcionamiento en tercera ventana, a una longitud de onda de 1550nm. En la Fig. 30 se ilustra la eficiencia de acoplo del grating para un rango de trabajo de longitudes de onda que van desde los 1450nm – 1650nm, obteniéndose un ancho de banda de 57nm.

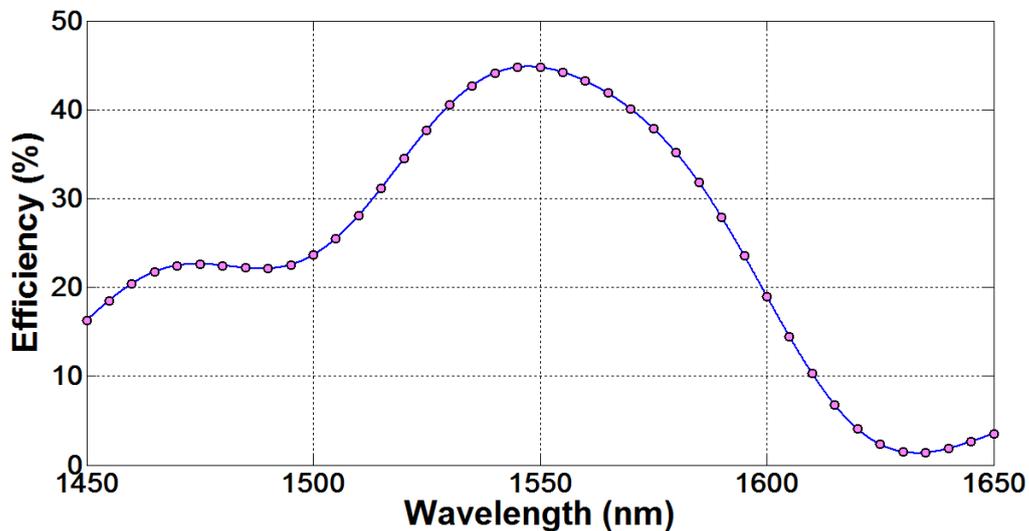


Fig.30.- Eficiencia de la respuesta espectral con los parámetros óptimos.

### III.4. Taper

Para acoplar el grating a la guía del circuito integrado fotónico es necesario la utilización de un taper que permita propagar el modo de una guía ancha (de la misma anchura del grating) a una estrecha (500nm para que se cumpla la condición monomodo) o viceversa, como se observa en la Fig. 31. En el primer caso (guía ancha – guía estrecha) es más susceptible a pérdidas que en el segundo caso (guía estrecha – guía ancha) donde las pérdidas son casi nulas.

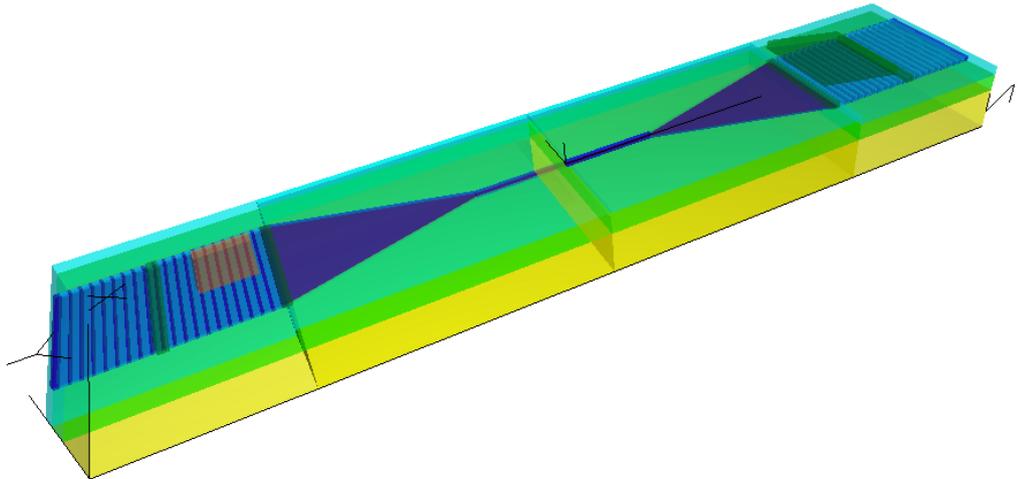


Fig.31.- Utilización de tapers para acoplar los grating con la guía de onda del PIC.

El parámetro esencial para el diseño del taper del cual dependen las pérdidas de propagación es la longitud. Por lo tanto, se ha realizado un barrido de simulaciones variando este parámetro en un taper de guía de onda ancha a estrecha, obteniéndose la longitud óptima que registre menos pérdidas. Para realizar la simulación de propagación del modo en el taper es necesario hacerlo en 3D para estimar las pérdidas de propagación en la estructura, de modo que se tenga en cuenta todo los parámetros de diseño del taper como el espesor de las capas de la guía, ancho de la guía ancha y estrecha, y longitud del taper, tal como se observa el CAD de la estructura en la Fig. 32.

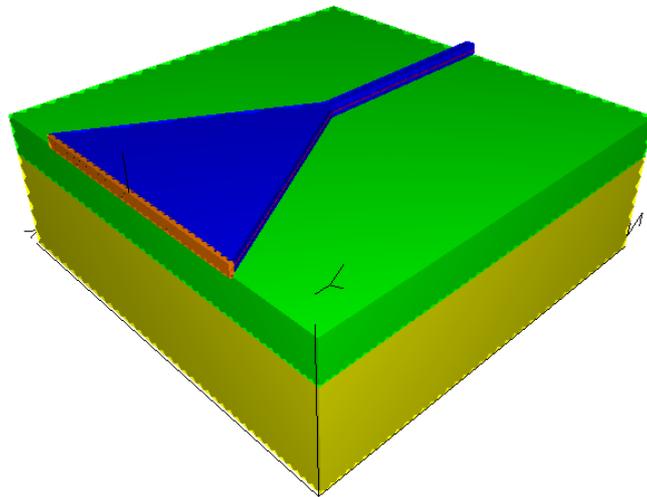


Fig.32.- CAD taper de guía de onda ancha a estrecha.

Se ha realizado una simulación variando la longitud del taper de 50 – 1000  $\mu\text{m}$ , y la longitud óptima registrada a partir de la cual las pérdidas de propagación se reducen al mínimo es de 350 $\mu\text{m}$ , con una eficiencia a nivel de potencia del 96%, tal como se observa en la Fig. 33.

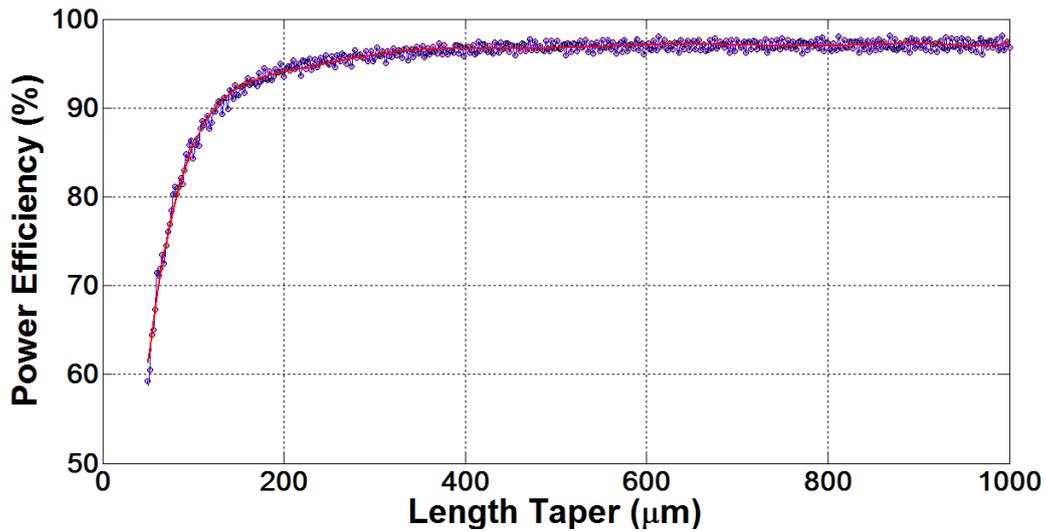


Fig.33.- Eficiencia de Potencia en función de longitud del taper.

### III.5. Simulaciones Grating Lineal 3D

Para confirmar los resultados obtenidos en el diseño y optimización del grating realizados en 2D, se ha simulado la estructura en 3D, tanto en sentido de acoplamiento de entrada como de salida, como se observan en los CAD de la Fig. 34.

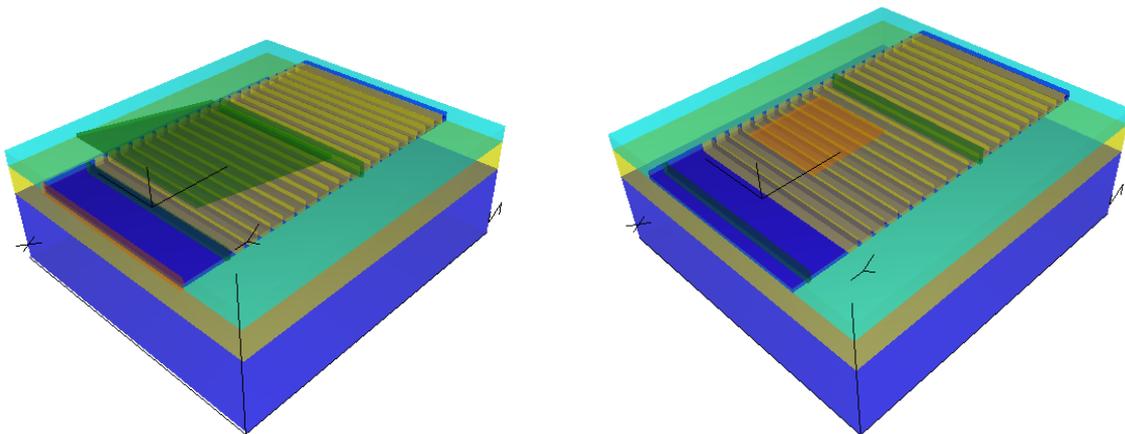


Fig.34.- Izquierda.- grating salida, Derecha.- grating entrada.

Las simulaciones 3D, a diferencia de las 2D toman en cuenta la anchura de la guía, en este caso una anchura de  $12\mu\text{m}$ . Los requerimientos computacionales para este tipo de simulaciones, con una resolución aceptable acorde a la utilizada en las simulaciones 2D, se incrementan significativamente al igual que el tiempo de simulación, de modo que el proceso de optimización de la estructura en 3D no es viable.

Los resultados obtenidos en simulación de eficiencia de potencia son aproximados con respecto a los obtenidos en las simulaciones 2D con lo cual se comprueba la validez del proceso de diseño y optimización de la estructura en el plano bidimensional sin tomar en cuenta el ancho de la guía, tal como se observa en la tabla 11.

	<b>Eficiencia de Potencia Simulaciones 2D [%]</b>	<b>Eficiencia de Potencia Simulaciones 3D [%]</b>
<b>Grating Salida</b>	49.02	42.28
<b>Grating Entrada</b>	42.19	34.16

Tabla 11: Resultados Simulaciones 2D y 3D

### III.6. Diseño de Grating Curvados a partir de parámetros óptimos grating lineales

Los grating curvados acoplan los modos de propagación directamente a la guía de onda del PIC, a diferencia de los grating lineales que requieren de un taper, lo que hace que su longitud sea mucho menor, lo cual optimiza la estructura de acoplo a nivel de dimensiones.

Es posible utilizar los parámetros de diseño de los grating lineales y elaborar estructuras de acoplo en base a elipses confocales, donde se mantiene un foco común y se construye cada elipse en función del periodo y el filling factor óptimos obtenidos en el diseño del grating lineal, de modo que se generen las áreas atacadas y no atacadas, luego al extraer un área de las elipses confocales diseñadas en forma de taper cuyo extremo estrecho (500nm) empiece en el punto focal común, y se extienda hasta la última elipse confocal en su extremo ancho (12 $\mu$ m), se genere el grating curvado. De acuerdo a [10], la condición de Bragg para el primer orden de difracción (Eq. (3)), puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\sqrt{x^2 + z^2} k_{in} n_{eff} - z k_{in} n_{top} \sin(\theta) = 2\pi q \quad (10)$$

Donde la vista superior del grating se encuentra en el plano (x, z), la distancia hacia el punto focal común se extiende a lo largo del eje z, y q es un entero que indica el orden del grating curvado. De la Eq. (10) se obtiene una expresión que permite describir un conjunto de elipses confocales con un punto focal común en el origen.

$$\frac{\left( z - \frac{q\lambda_0 n_c \sin(\theta)}{n_{eff}^2 - n_c^2 \sin^2(\theta)} \right)^2}{\left( \frac{q\lambda_0 n_{eff}}{n_{eff}^2 - n_c^2 \sin^2(\theta)} \right)^2} + \frac{x^2}{\left( \frac{q\lambda_0}{\sqrt{n_{eff}^2 - n_c^2 \sin^2(\theta)}} \right)^2} = 1 \quad (11)$$

En la Fig. 35 se puede observar una imagen del GDS (Graphic Database System) de sus siglas en inglés, con respecto al formato: sistema de base de datos gráfico utilizado para el diseño de circuitos integrados, con el cual se representa el grating curvado en el plano (x, z) en el cual se ha fijado la distancia focal en 36 $\mu$ m y los parámetros óptimos de diseño, resultados de las simulaciones de los grating lineales.

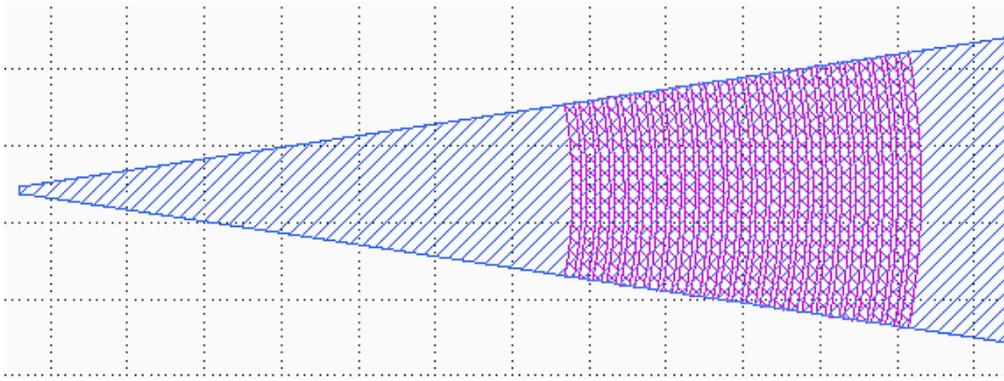


Fig.35.- GDS Grating Curvado.

### III.7. Simulaciones Grating Curvados 3D

Para comprobar mediante simulación el proceso de conversión de grating lineal ha curvado, se realizaron los CAD de las estructuras tanto en sentido de salida como de entrada y se simuló su eficiencia. Este tipo de estructuras solo puede ser simulado en 3D, tal como se puede observar en la Fig. 36.

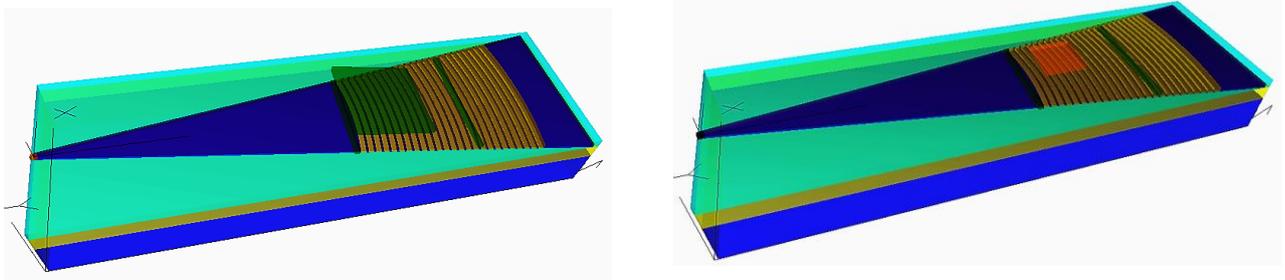


Fig.36.- Izquierda.- grating salida, Derecha.- grating entrada.

En la simulación de los grating curvados se observó que los requerimientos computacionales así como los tiempos de simulación se incrementan en gran medida debido a las elipses, por lo cual la resolución de simulación se tuvo que incrementar, sin que se afecte a la precisión de los resultados de simulación, pudiendo así efectuar las simulaciones. Por tal razón la optimización de este tipo de estructuras en 3D no es factible. En la tabla 12 se resumen los resultados obtenidos de simulación tanto de los grating lineales como de los curvados.

	Grating Lineales		Grating Curvados
	Eficiencia de Potencia Simulaciones 2D [%]	Eficiencia de Potencia Simulaciones 3D [%]	Eficiencia de Potencia Simulaciones 3D [%]
<b>Grating Salida</b>	49.02	42.28	49.84
<b>Grating Entrada</b>	42.19	34.16	33.73

Tabla 12: Resultados Simulaciones grating lineales y curvados

## IV. FABRICACIÓN

### IV.1. *Proceso de Fabricación*

Una oblea de silicio (SOI) está compuesta por varias capas de materiales con diferente espesor: la parte intermedia la compone una capa uniforme de óxido de silicio  $\text{SiO}_2$  de  $2\mu\text{m}$ , la parte de abajo es una capa base de sustrato de silicio de alrededor de  $700\mu\text{m}$  y la capa superficie es de silicio cristalino de  $220\text{nm}$ . Para la fabricación de la guía de onda slot se han depositado sobre el silicio cristalino una capa de nitruro de silicio  $\text{Si}_3\text{O}_4$  de  $50\text{nm}$  y sobre esta una capa de silicio amorfo (a-Si) de  $320\mu\text{m}$ . Para la fabricación de la guía de onda se sigue un proceso que consiste en varios pasos que se describen a continuación y se muestran en la Fig. 37.:

- 1- Se aplica una resina sobre toda la superficie de la oblea de silicio la cual previamente se ha limpiado y secado.
- 2- La oblea es alineada con una máscara y expuesta mediante un cañón de electrones con el que se consiguen una precisión del orden de nanómetros. A este proceso se le denomina litografía.
- 3- Las partes expuestas son eliminadas mediante un baño químico.
- 4- La capa superior es grabada de acuerdo a la parte no expuesta de la resina que no ha sido eliminada.
- 5- La resina restante es eliminada.

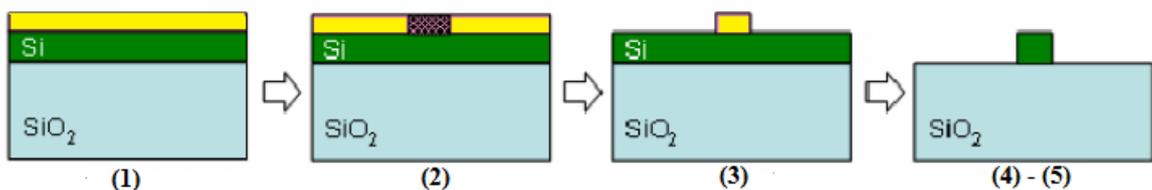


Fig.37.- Proceso de fabricación de una guía de onda.

El proceso de fabricación del grating es parecido y se realiza posterior a la fabricación de las guías.

### IV.2. *Grating Fabricados*

Para la caracterización se fabricó un conjunto de gratings que acoplan el modo de propagación proveniente de una fibra óptica monomodo a una guía de onda de  $500\text{nm}$  de ancho con diferentes longitudes ( $125\mu\text{m}$ ,  $250\mu\text{m}$ ,  $500\mu\text{m}$ ,  $750\mu\text{m}$  y  $1000\mu\text{m}$ ) para estimar las pérdidas de propagación, luego el modo acoplado a la guía de onda se propaga hasta otro grating que difracta la luz hacia otra fibra óptica monomodo de manera que se pueda medir la eficiencia de potencia óptica de la estructura de acoplo de entrada y salida. Se fabricaron dos grupos de grating, lineales y curvados, tal como se observa en la Fig. 38 correspondiente al GDS que define las áreas que serán expuestas y cuales no en el proceso de litografía.

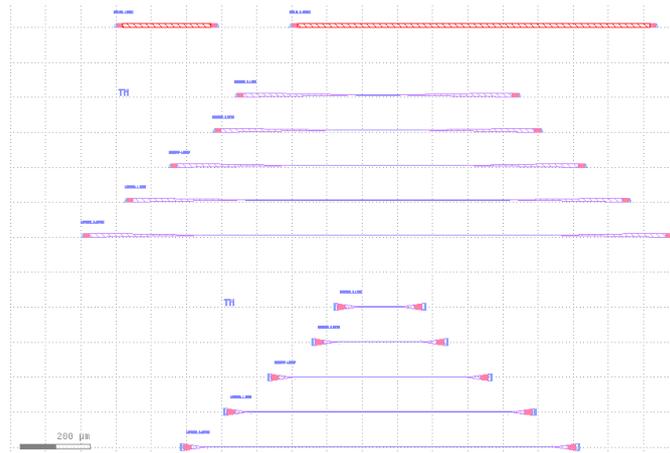


Fig.38.- GDS para fabricación.

La Fig. 39 se ilustra los grating fabricados vistos desde el microscopio, donde se puede observar la diferencia de escala entre las estructuras diseñadas y las fibras ópticas.



Fig.39.- Bloques de Grating Fabricados.

Posterior a la caracterización de las estructura de acoplo fabricadas, con el propósito de comprobar que los parámetros de fabricación del grating hayan estado dentro del rango de los de diseño en simulación, se hicieron varias imágenes de la muestra vistas desde el microscopio de electrones, SEM (scanning electron microscope) para medirlos. La Fig. 40 muestra la imagen del grating lineal.

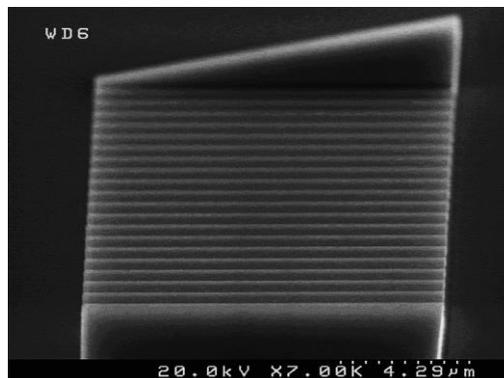


Fig.40.- Grating lineal.

La Fig. 41 muestra las medidas tomadas con respecto al periodo del grating, y el filling factor, donde se puede observar que el periodo del grating fabricado es de 902.8nm, que es muy parecido a los 918nm óptimos de simulación. Se observa también que la longitud de la parte atacada 'de' del grating es de 531.1nm y la parte no atacada 'du' de 371.8nm, lo que corresponde a un filling factor 'Ff' de 58.82%, siendo el óptimo simulado de 65%.

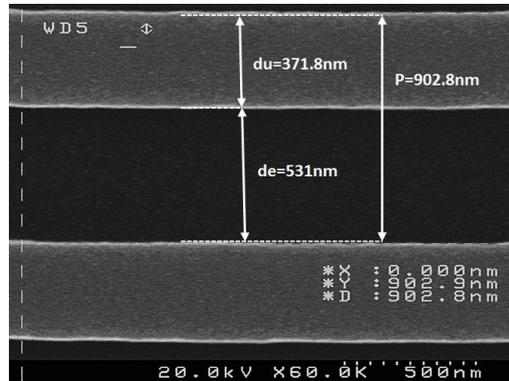


Fig.41.- Parámetros Grating lineal.

En la Fig. 42 se ilustra una imagen SEM del grating curvado. Se observa también que ha añadido varios picos al final del grating, con el propósito de disminuir las reflexiones.

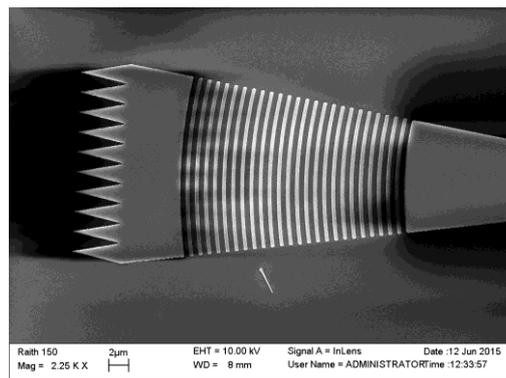


Fig.42.- Grating curvado.

La Fig. 43 muestra las medidas tomadas del grating curvado con respecto al periodo, y el filling factor, donde se puede observar que el periodo del grating fabricado es de 908.1nm, que de nuevo se ajusta muy bien a los 918nm óptimos de simulación. Se observa también que la longitud de la parte atacada 'de' del grating es de 579.3nm y la parte no atacada 'du' de 329.1nm, lo que corresponde a un filling factor 'Ff' de 64.24%, siendo el óptimo simulado de 65%.

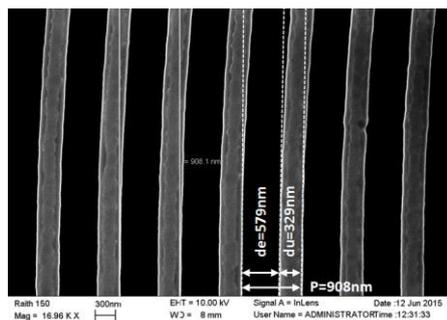


Fig.43.- Parámetros Grating curvado.

La Fig. 44 muestra un corte transversal realizado en la muestra correspondiente a la guía slot, de modo que se puede comprobar el espesor de las capas fabricadas. Como se puede observar la capa de nitruro de silicio (slot) tiene un espesor de 50.59nm, comparado a los 50nm parámetro óptimo en simulación, y la capa de silicio amorfo ( $L_{Si\_up}$ ) tiene 101.2nm, comparado al parámetro óptimo de simulación de 320nm.

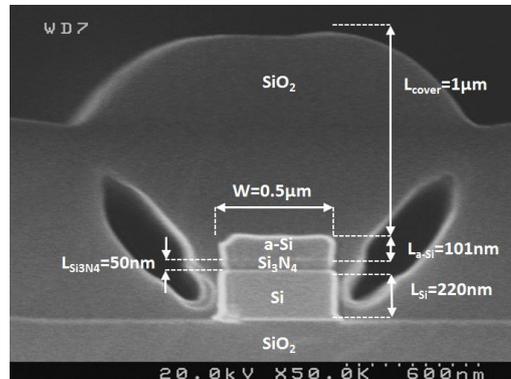


Fig.44.- Corte Transversal de la guía de onda y medición de espesor de las capas

Por lo que se puede observar existe una variación significativa en el espesor de la capa de silicio amorfo con respecto a los parámetros óptimos obtenidos en simulación. Por tal razón, los resultados obtenidos en caracterización tuvieron una variación con respecto a los de simulación.

## V. CARACTERIZACIÓN

### V.1. Pruebas de Acoplo

Para caracterizar el funcionamiento de los grating diseñados se fabricaron 4 bloques de gratings con diferentes niveles de exposición en el proceso de litografía, con la finalidad de mejorar el proceso de fabricación al establecer un tiempo óptimo de exposición. En la Fig. 45 se hace referencia a la muestra y se referencia la posición de cada bloque en la misma.

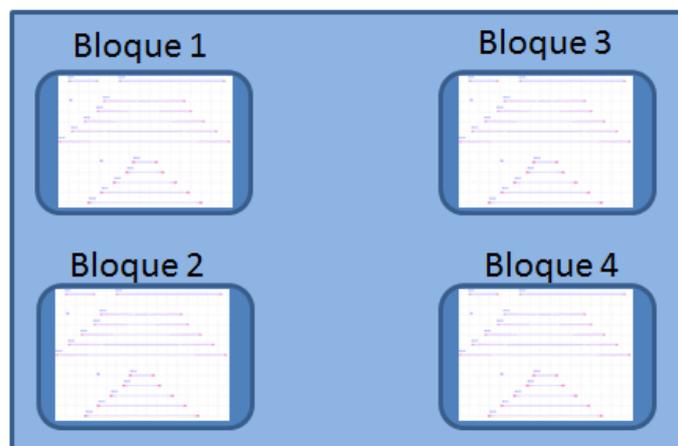


Fig.45.- Muestra con los 4 bloques de grating fabricados.

Para la realización de las medidas, se utilizó una fuente laser de banda ancha (SANTEC TSL-210F), un medidor de potencia (Thorlabs, PM320E), un filtro de polarización, posicionadores con

ajuste a escala micrométrica de la muestra y de la fibra óptica, un microscopio, y un ordenador con un programa LabView que permite visualizar el espectro de transmisión medido, tal como se observa en la Fig. 46.

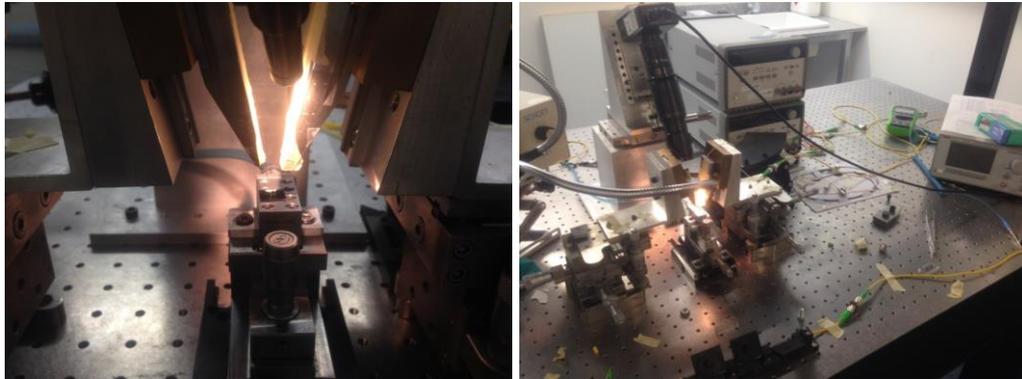


Fig.46.- Escenario de medición para la estructura de acoplamiento.

Las fibras ópticas de entrada y salida están fijadas a  $10^\circ$  con respecto a la muestra. Inicialmente se alinea la muestra a medir: grating de entrada y salida a las fibras monomodo de emisión y recepción de luz, de modo que a una longitud de onda ajustada en la fuente laser con una potencia fijada a 0dBm (1mW) la luz es inyectada en la fibra de entrada. Posicionando el polarizador para alcanzar TM, se obtiene la mayor potencia óptica en la fibra de salida lo que se registra en el medidor de potencia, comprobando así el funcionamiento de la estructura de acoplo. Ya alineada la muestra, se procede a realizar un barrido en diferentes longitudes de onda, de modo que se pueda obtener la respuesta espectral de la estructura, así como también las pérdidas por inserción con respecto a la longitud de onda con la cual se diseñó el grating. Este proceso se repite para cada bloque para diferentes longitudes de la guía de 500nm.

## V.2. Resultados experimentales

Realizadas las medidas para cada bloque, tanto de los grating lineales como de los curvados, los mejores resultados se obtuvieron para el primer bloque. En La Fig. 47 se muestra los resultados de los grating lineales, donde se observa que la longitud de operación del grating se encuentra centrada alrededor de los 1565nm, y la mejor potencia de salida se obtiene en la guía de  $125\mu\text{m}$ , como era de esperarse al ser la más corta, con una potencia de -23.32dBm.

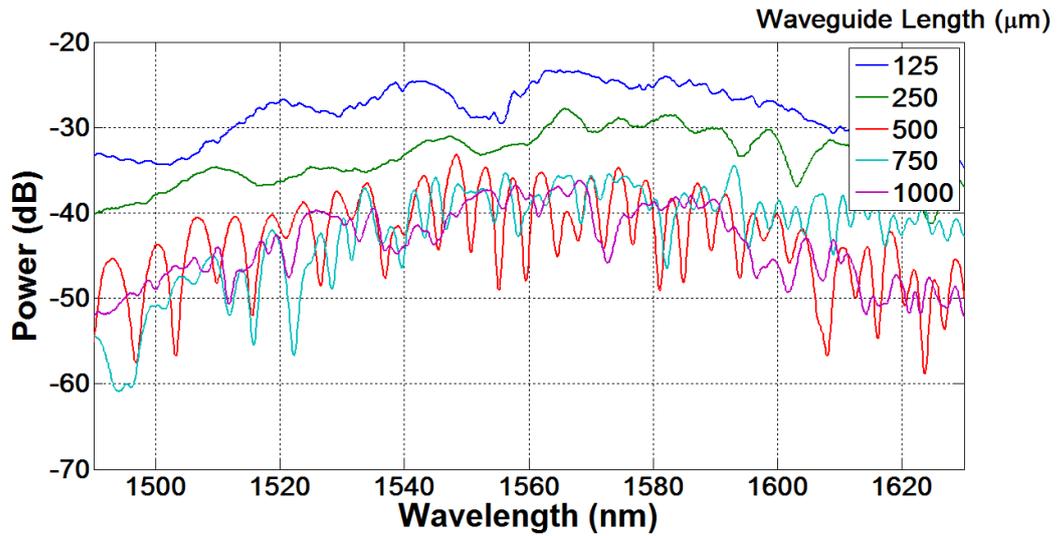


Fig.47.- Respuesta espectral grating lineales.

En La Fig. 48 se muestra los resultados de los grating curvados, donde se observa que la longitud de operación del grating se encuentra centrada alrededor de los 1565nm, y la mejor potencia de salida es -16.37dBm.

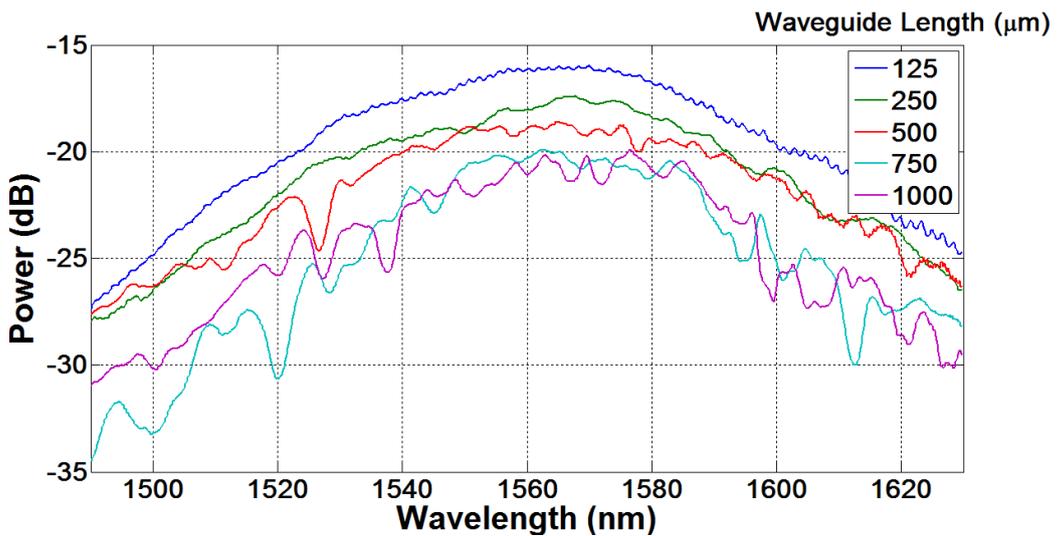


Fig.48.- Respuesta espectral grating curvados.

El ancho de banda a 1 dB del grating curvado es de 34nm, tal como se observa en la Fig.49.

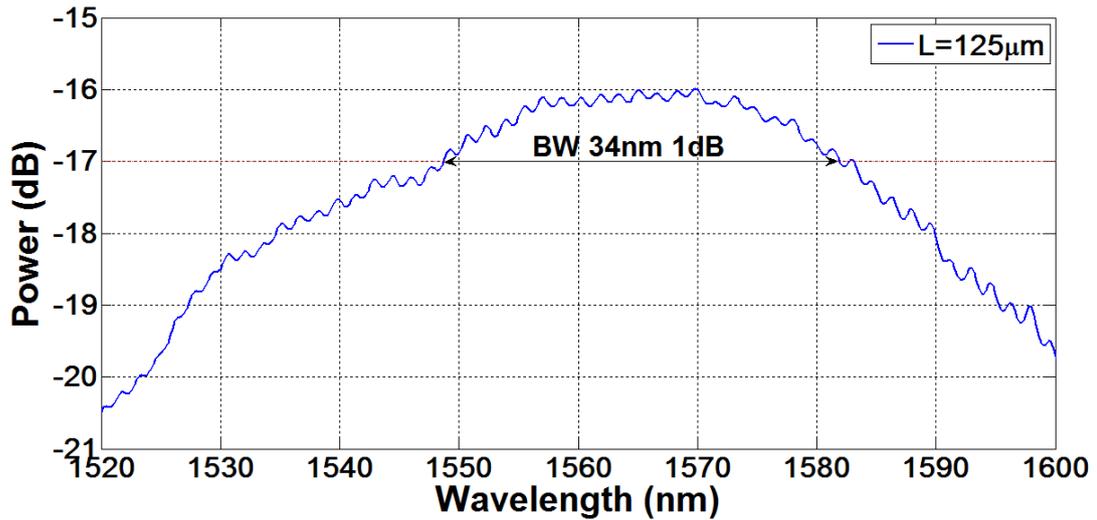


Fig.49.- Ancho de banda 1dB grating curvado.

### V.3. Pérdidas de propagación

Para obtener las pérdidas de propagación en la guía de onda de 500nm, se ha utilizado el método cut-back, que se basa en la comparación de transmisión a través de guías de onda de diferentes longitudes adecuando la dependencia a la longitud asumiendo condiciones de acoplamiento y rugosidad de la superficie idénticos. En la Fig. 50 se observa que las pérdidas de propagación de la guía slot de 500nm están alrededor de los 5dB/cm para la longitud de onda de operación de 1550nm.

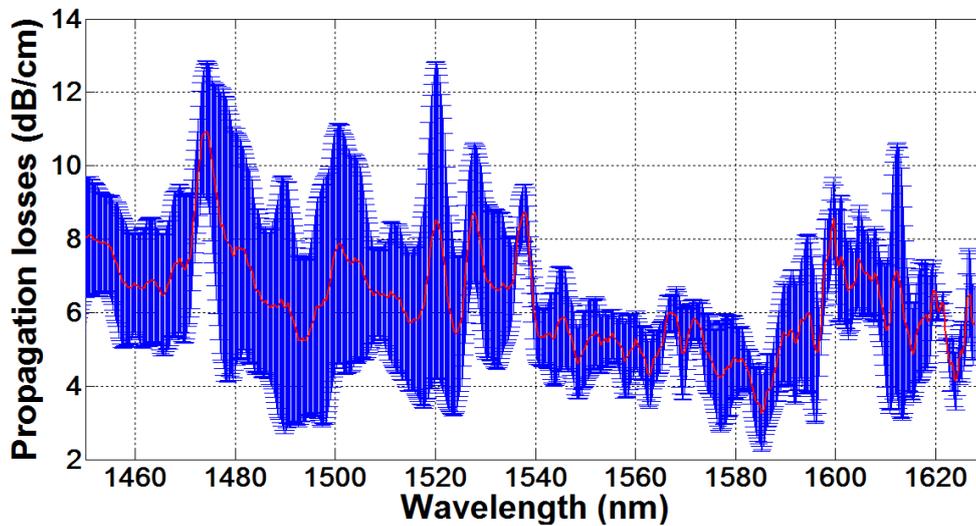


Fig.50.- Pérdidas de propagación.

### V.4. Pérdidas de acoplo

Una vez obtenidas las pérdidas de propagación en la guía es posible estimar las pérdidas de acoplo de acuerdo a la ecuación de balance de potencias:

$$P_{out,dBm} = P_{in,dBm} - 2\alpha_C - \alpha_{Tin} - \alpha_{Tout} - \alpha_S - \alpha_{WG}L$$

$$\alpha_C = \frac{1}{2}(P_{in,dBm} - P_{out,dBm} - \alpha_{Tin} - \alpha_{Tout} - \alpha_S - \alpha_{WG}L)$$
(12)

Donde  $P_{in, dBm}$  es la potencia óptica de entrada 0dBm,  $P_{out, dBm}$  es la potencia óptica obtenida a la salida,  $\alpha_s$  representa las pérdidas del setup (conectores y polarizador, que en nuestro caso son de alrededor de 2dB),  $\alpha_{Tin}$  representa las pérdidas del taper de entrada y  $\alpha_{Tout}$  las pérdidas del taper de salida, pérdidas de alrededor de 2.05dB,  $\alpha_{WG}$  representa las pérdidas de propagación de 5dB/cm,  $L$  representa la longitud de la guía de 500nm y  $\alpha_C$  representa las pérdidas de acoplo del grating. En el caso de los grating curvados se omitirán las pérdidas debido a los tapers. En la tabla 13 se ilustra las pérdidas de acoplo tanto para los grating lineales como para los curvados, obtenidos en simulación y de manera experimental.

	<b>Resultados Simulación 3D</b>	<b>Resultados experimentales</b>
	<b><math>\alpha_C</math> (dB)@1550nm (12)</b>	
<b>Grating lineales</b>	4.2	10.74
<b>Grating curvados</b>	3.87	7.41

Tabla 13: Resultados pérdidas de acoplamiento

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos experimentalmente difieren a los obtenidos en la etapa de simulación debido a desviaciones de los parámetros óptimos de diseño, resultado del proceso de nanofabricación, donde uno de los parámetros que ha sufrido una gran variación corresponde el espesor de la capa de silicio amorfo ( $L_{Si\_up}$ ) que debía alcanzar los 320nm, y se ha fabricado con 101nm de espesor, lo que ha reducido ampliamente la eficiencia de acoplo que se tenía prevista a la obtenida en simulación. No obstante se ha simulado la estructura de acoplo con los parámetros de diseño alcanzados en fabricación de modo que se pudiera constatar que la baja eficiencia de acoplo alcanzada ha sido resultado al espesor de la capa de silicio amorfo inferior al valor óptimo. Tal como se puede observar en la gráfica antes expuesta de la eficiencia en función de la variación de la capa superior de silicio  $L_{Si\_up}$  y del periodo  $P$  (Fig. 27), la eficiencia de acoplo en simulación para dicho espesor está entre el 10 y 15% similar a la eficiencia obtenida experimentalmente de -8dB.

El diseño de gratings curvados a partir de los parámetros óptimos del diseño de grating lineales, optimiza la estructura de acoplo en tamaño, ya que se evita la utilización de tapers lo que disminuye ampliamente la longitud del acoplador. En nuestro caso, también se ha obtenido mejor eficiencia de acoplo de los curvados respecto a los lineales.

Respecto a los gratings curvados, las simulaciones de las estructuras en 3D resultan en un alto coste computacional y tiempo de simulación, de modo que el proceso de optimización de parámetros de diseño resulta en algunos casos no viable. Sin embargo, las simulaciones 3D han permitido predecir de antemano la viabilidad de un modelo de estructura que no puede ser simulada en 2D antes de ser fabricada, ahorrando de esta manera costos en fabricación y tiempo.

## AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento al NTC por permitir llevar a cabo esta investigación, en especial a la Dra. Ana María Gutiérrez Campo y al Dr. Pablo Sanchis Kilders por dirigir y encaminar este trabajo lo cual ha permitido terminarlo con éxito.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Vermeulen et. al., “High-efficiency fiber-to-chip grating couplers realized using an advanced CMOS-compatible Silicon-On-Insulator platform,” *Optics Express*, Vol. 18, Issue 17, pp. 18278-18283, 2010.
- [2] Shankar Kumar et. al., “Highly efficient grating coupler between optical fiber and silicon photonic circuit,” in *Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2009), paper CTuC6.
- [3] J. V. Galan, P. Sanchis., “Study of High Efficiency Grating Couplers for Silicon-Based Horizontal Slot Waveguides,” *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 20, No. 12, June 15, 2008.
- [4] A. Pérez et. al., “Obtention and characterization of Silicon Nitride as antireflection coating by optoelectronics devices,” *Opt. pura apl*, Sociedad Española de Óptica, ISSN: 0030-3917, Elche, Alicante, 2003.
- [5] V. R. Almeida, Q. Xu, and M. Lipson et. al., “Guiding and confining light in void nanostructure,” *Optics Letters*, Vol.29, no.11, p.1209-1211, 2004.
- [6] M. Iqbal, Z. Zheng and J.S. Liu.“Slot Optical Waveguides Simulations and Modeling, Passive Microwave Components and Antennas”, Vitaliy Zhurbenko (Ed.), ISBN: 978-953-307-083-4, InTech, DOI: 10.5772/9414, 2010.
- [7] J. Galán., “Addressing Fiber-to-Chip Coupling Issues in Silicon Photonics”, *Universitat Politècnica de Catalunya*, Doctoral Thesis, 2010.
- [8] L. Vivien et al., “Light Injection in SOI Microwaveguides Using High-Efficiency Grating Couplers”, *Journal Of Lightwave Technology*, Vol. 24, no. 10, pp.3810-3815, October 2006.
- [9] Synopsys. (2015). *Optical Solutions*. Recuperado el 03 de 2015, de Rsoft Products Overview: <http://optics.synopsys.com/rsoft/>
- [10]F. Van Laere, T. Claes, J. Schrauwen, S. Scheerlinck, W. Bogaerts, D. Taillaert, L. O'Faolain, D. Van Thourhout, R. Baets, "Compact Focusing Grating Couplers for Silicon-on-Insulator Integrated Circuits," *Phot. Tech. Lett.* 19, 1919 (2007).