



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo

Trabajo Fin de Grado

CARACTERIZACIÓN DE GUÍAS ÓPTICAS EN EL ESPECTRO VISIBLE

Facultad de Ciencias
Grado en Física

Julio 2023

Autora: Berta Fernández Vior

Tutor: Adrián Fernández Gavela

Índice

1	Introducción	3
2	Conceptos básicos: Guías Ópticas	5
2.1	Fundamentos Teóricos de las Guías Ópticas	5
2.1.1	Propagación de la Luz en Guías Ópticas	5
2.1.2	Tipos de Guías Ópticas	7
2.1.3	Condiciones del Guiado de la Luz. Modos de la Guía	9
2.2	Diseño y Fabricación de Guías Ópticas	16
2.2.1	Técnicas de Fabricación	16
2.2.2	Tipos de Materiales en Guías Ópticas	21
2.3	Caracterización de Guías Ópticas	25
2.3.1	Técnicas de Acoplamiento de la Luz en Guías Ópticas	26
2.3.2	Medidas de los Índices de Refracción	34
2.3.3	Parámetros de Rendimiento: Pérdidas en Guías Ópticas	38
3	Circuitos Ópticos Integrados	43
3.1	Diseño de Circuitos Ópticos Integrados	45
3.1.1	Diseño de Componentes y Optimización	46
3.1.2	Diseño de Circuitos y Simulación	47
3.1.3	Paquetes de Diseño de Procesos (PDK)	48
3.1.4	Generación del Diseño o la Distribución Física	48
3.1.5	Verificaciones	49
3.2	Técnicas de Fabricación de Circuitos Ópticos Integrados	49
3.2.1	Técnicas de Creación de Patrones	50
3.2.2	Técnicas de Procesamiento	53
3.2.3	Fabricación de las Guías (3D)	55
3.2.4	Fabricación de Gratings	56
3.3	Componentes Principales de los Circuitos Ópticos Integrados	58
3.3.1	Desviadores del Camino Óptico (Optical Path-Bending Components)	58
3.3.2	Divisores de Potencia (Power Dividers)	60
3.3.3	Otros Tipos de Componentes en Circuitos Ópticos Integrados	62

3.4	Aplicaciones de los Circuitos Ópticos Integrados	63
3.5	Características del Dispositivo Estudiado Experimentalmente	65
4	Caracterización en el Visible de un Chip de Si₃ N₄	69
4.1	Dispositivo Experimental y Procedimiento	72
4.1.1	Dispositivo Experimental	72
4.1.2	Procedimiento Experimental	76
4.2	Resultados Experimentales	80
4.2.1	Pérdidas por Unidad de Longitud y Gratings	80
4.2.2	Pérdidas de las Curvas	84
4.2.3	Pérdidas de los Multi-Mode Interferometers (MMI's)	86
5	Conclusiones	89
	Referencias	91

1. Introducción

Tanto las guías ópticas como las fibras, así como la integración en circuitos de las primeras, tienen numerosas aplicaciones de gran utilidad. Quizás, lo más extendido y conocido es su aplicación en el ámbito de las comunicaciones, sin embargo tienen muchas más. Su gran versatilidad es la que permite que su uso esté extendido a lo largo de múltiples campos. Esa versatilidad es ofrecida por sus características, entre las que se incluye su gran capacidad para transmitir señales ópticas. Esta última capacidad, dota a estos sistemas de un gran valor en el ámbito de las telecomunicaciones, pero también en cualquier otro que emplee tecnologías que involucren a la luz. La forma en la que se propaga la luz en su interior permite, a su vez, que las tecnologías en las que se apliquen sean más rápidas, seguras y eficientes, ya que minimizan las pérdidas en la señal con respecto a otros métodos tradicionales.

Tal y como se menciona en publicaciones recientes, como por ejemplo [1], su abanico de aplicaciones va desde, las ya mencionadas telecomunicaciones, a campos como el de la medicina o el militar, pasando por otros como la industria automovilística. Una de las aplicaciones más notable es el uso de estos dispositivos como sensor en múltiples ámbitos, destacando el de la biología, donde los biosensores han ganado importancia recientemente.

Debido a las numerosas utilidades que tienen, en la actualidad, su estudio se encuentra en constante desarrollo, habiendo logrado significativos avances en los últimos años. Un ejemplo de ello se encuentra en estudios bastante actuales (año 2022), como los mostrados en los artículos [2] y [3]. Estos estudios se centran, principalmente, en perfeccionar estos dispositivos. Para ello se busca mejorar los rendimientos, minimizando las pérdidas; lo que se traducirá en la búsqueda de nuevos diseños, con diferentes dimensiones, disposiciones o materiales. Otro de los retos actuales es reducir el tamaño de los dispositivos, buscando, así, la integración de circuitos en sustratos cada vez más pequeños. Todo lo anterior, junto con su gran fiabilidad y la reducción de costes energéticos y de producción, es lo que ha permitido su auge en los últimos años.

Una particularidad destacable del chip empleado en este trabajo, a diferencia de estudios como los ya mencionados, en los que los dispositivos funcionaban con longitudes de onda en el rango del IR, es que en este caso el guiado de la luz es posible empleando longitudes de onda más cortas, en el rango del espectro visible; esto es algo que hasta ahora no se había llevado a cabo en muchos trabajos de investigación de óptica integrada, de ahí su especial importancia.

Los objetivos fundamentales en los que se centra este trabajo son conocer el funcionamiento de las guías, cómo se propaga la luz en ellas, cómo se pueden fabricar o cuáles son las formas de caracterizarlas, destacando sus parámetros de rendimiento. También será relevante saber cómo se integran en circuitos, junto con el diseño y la fabricación de los mismos. Finalmente, conocidos todos los fenómenos que tienen lugar y todo el proceso hasta llegar a tener un chip, vendrá uno de los pasos fundamentales, la caracterización. En concreto, lo que se pretende en este trabajo es comprobar las pérdidas de potencia óptica que sufre el chip al acoplar luz en él. Intentando determinar de esa manera, si el diseño y el proceso de fabricación del chip son óptimos o no.

Por último, una parte a destacar de este trabajo, es que se realiza en colaboración con el *Centro Nacional de Microelectrónica (CNM)* de Barcelona. Toda la parte previa a la última fase, es decir, los procesos de diseño, las diferentes simulaciones que son necesarias realizar, junto con la fabricación del circuito integrado estudiado, han sido realizados por parte de este centro. Mientras que la parte de caracterización del dispositivo, es la llevada a cabo en la parte experimental de este trabajo, basada, como ya se ha mencionado con anterioridad, en conocer las pérdidas que se ocasionan en los distintos componentes del circuito, lo que va a permitir, a su vez, una mejora posterior de este último.

2. Conceptos básicos: *Guías Ópticas*

Entre los conceptos fundamentales que destacarán a lo largo del trabajo se encuentra uno que es bastante relevante, el de guía óptica. Una guía óptica es, básicamente, un material que permite guiar la luz, por su interior, desde uno de sus extremos al otro (en el caso de que la distancia entre estos extremos sea grande se denominarán fibras ópticas, mientras que si la distancia es muy corta y se encuentra integrada dentro de un mismo chip, se conocerá simplemente como guía óptica). Están formadas por un material dieléctrico, recubierto por otro con menor índice de refracción, lo que permitirá la existencia de la reflexión total interna, y por tanto, el confinamiento de la luz dentro del núcleo de la guía. Estos dos últimos conceptos, la *reflexión total interna* y el *confinamiento óptico*, son la clave para que las guías ópticas sean realmente útiles en la transmisión de señales ópticas (y, por tanto, de información) sin pérdidas significativas de intensidad.

2.1. Fundamentos Teóricos de las Guías Ópticas

En primer lugar, será necesario conocer cómo funcionan las guías ópticas. Para ello, se comentará cómo se propaga la luz en ellas, qué tipos de guías existen, qué son sus modos de propagación y las condiciones de modos acoplados.

2.1.1. Propagación de la Luz en Guías Ópticas

La explicación de cómo se propaga la luz en las guías ópticas se fundamenta en una serie de conceptos básicos. Principalmente, se habla de todos aquellos que están involucrados en el comportamiento de la luz al incidir en la separación de dos medios en los que su velocidad de propagación es diferente. Por tanto, se podrá hablar de conceptos como incidencia, reflexión, índice de refracción o los diferentes ángulos con los que llega o sale la luz de la intercara, que proporcionarán información sobre otras nociones fundamentales como pueden ser el ángulo crítico y la reflexión total interna.

Como ya se ha mencionado anteriormente, una guía óptica está formada por materiales con distinto índice de refracción. Esto implica que, cuando la luz que se está propagando llega a la separación entre dos medios diferentes, sufra una serie de fenómenos físicos. Uno de ellos es la *refracción* (Figura (1) caso (A)), que consiste, básicamente, en que cuando la luz comienza a propagarse en otro medio, su velocidad de propagación en él es diferente y por tanto, el ángulo que forma con la normal a la superficie (θ_2) es distinto al que formaba cuando incidía desde el primer medio (θ_1). Otro de estos fenómenos es la *reflexión*. En este caso, lo que ocurre es que parte de esa luz incidente en la superficie

de separación de los medios, vuelve al medio en el que se estaba propagando, con el mismo ángulo con respecto a la normal que tenía el haz incidente, (θ_1). Tal y como se mencionó previamente, los cambios en la propagación de la luz en los diferentes medios, vienen dados por cuál es su velocidad al propagarse en ellos. Para analizar esas diferencias se introduce la definición de *índice de refracción*, n , que consiste en el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío (c) y la velocidad de la luz en un medio determinado (v). Es decir, $n_i = \frac{c}{v_i}$. La relación entre los ángulos mencionados, θ_1 y θ_2 , y los índices de refracción de los diferentes medios, viene dada por la *Ley de Snell*, (1):

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2 \quad (1)$$

Una vez se tiene en cuenta esta igualdad, se puede ahondar en alguno de los diferentes conceptos ya mencionados. Uno de ellos es el de *ángulo crítico*. Para la definición de éste, es preciso fijarse en la Figura (1) caso (B). En ella se aprecia que el ángulo del haz refractado, θ_2 , es 90° . Por la forma en la que está acotado el seno, para que se dé esta condición, es necesario considerar que $n_2 < n_1$. De esta manera, si se utilizan estos valores en la expresión (1), se obtiene que el ángulo crítico viene dado por (2):

$$\theta_c = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (2)$$

Ya conocido este concepto, es posible hablar de qué es la *reflexión total interna*. En este caso se observará una situación análoga a lo que ocurre en la Figura (1) caso (C). Partiendo de uno de los requisitos para los índices de refracción ya considerado, $n_2 < n_1$, tendrá lugar la reflexión total interna cuando el haz incidente no atraviese la interfaz hacia el otro medio, sino que toda la luz sea reflejada al medio de partida. Este fenómeno ocurrirá siempre y cuando el ángulo de incidencia sea mayor que el ángulo crítico o ángulo límite.

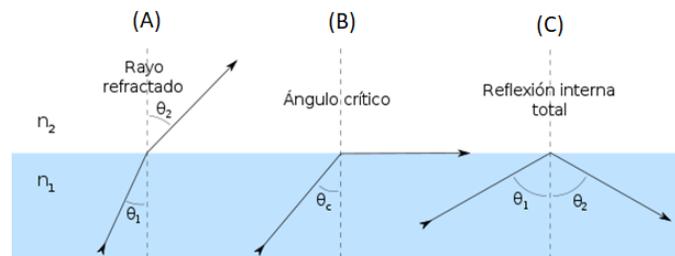


Figura 1: Propagación de la luz entre dos medios con distinto índice de refracción [4]

La propagación de la luz en las guías ópticas se fundamenta en este último concepto [5], la condición de *Reflexión Total Interna*, también conocida como *TIR*, por sus siglas en inglés. En una guía óptica se

tiene un núcleo, por el cual se propaga la luz, que tiene mayor índice de refracción que los medios que lo rodean. Estos medios se denominan cubierta y sustrato, y para que ocurra el confinamiento óptico en el núcleo, y la luz sea guiada por él, debe darse la condición de reflexión total interna en ambos. Esto se puede apreciar en la Figura (2), donde se ve cómo se producen numerosas reflexiones totales en las dos intercaras. Las condiciones para que esto ocurra son las siguientes [5]:

- El índice de refracción del núcleo, n_f , tiene que ser mayor que el índice de refracción del sustrato, n_s , y mayor que el índice de refracción de la cubierta, n_c .
- El ángulo de incidencia, θ_i , debe ser mayor que el ángulo crítico cuando incide tanto sobre la cubierta como sobre el sustrato, de forma que:

$$\theta_i > \theta_{c(s,c)} = \arcsin\left(\frac{n_{s,c}}{n_f}\right) \quad (3)$$

- Otra de las condiciones que se necesitará es que las diferentes ondas creadas en las distintas reflexiones totales, interfieran siguiendo un patrón determinado, para que la luz sea guiada. Esto se conoce como *modos de la guía* y se analizarán con más profundidad en el apartado (2.1.3).

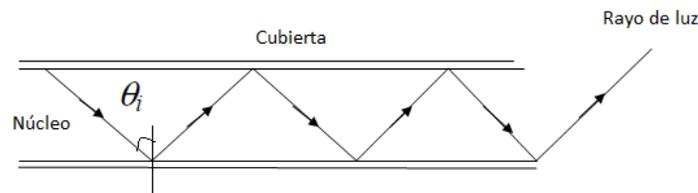


Figura 2: Esquema confinamiento óptico y propagación del haz dentro de la guía [6]

2.1.2. Tipos de Guías Ópticas

En esta sección se pretende realizar una breve clasificación de las guías ópticas en función de su dimensionalidad y la variación de los índices de refracción de los diferentes medios materiales [7]. Esta clasificación será relevante para poder determinar las características de los modos guiados de cada tipo de guía. En concreto, se analizarán las *Guías Ópticas Planas (2D)*, tanto las de *Índice de Salto* como las de *Índice Gradual*, y las *Guías Ópticas en 3D o acanaladas*.

- **Guías Ópticas Planas (2D)** [7]: En este caso, se trata de una guía que sigue el esquema mostrado en la Figura (3).

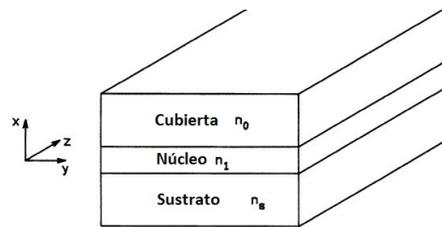


Figura 3: Esquema de la estructura básica de la guía plana [8]

Concretando un poco más, este tipo de guías ópticas consistirían en unas finas capas, depositadas sobre unos sustratos transparentes, de un material dieléctrico y que, además, posea un índice de refracción menor que la fina capa depositada en él. Se podrán diferenciar dos subtipos, según el perfil de índice que tengan, es decir, en función de como varíe el índice de refracción de acuerdo con la profundidad. Se puede distinguir entre *Índice de Salto* (Figura (4) (A)), donde el perfil del índice cambia de forma que aparecen dos discontinuidades notables en la separación entre los diferentes medios. E *Índice Gradual* (Figura (4) (B)), donde se aprecia como el cambio en el índice de refracción se va produciendo de forma progresiva.

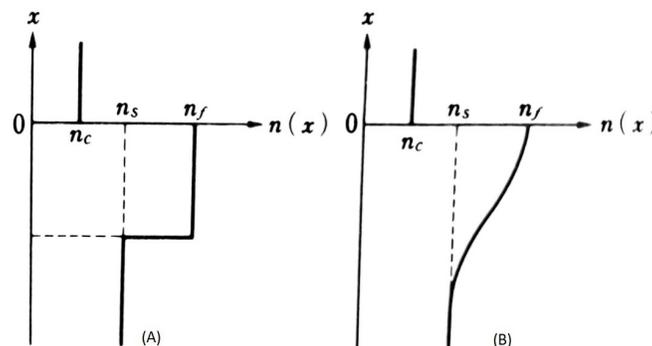


Figura 4: Perfil de índice de salto (A) y perfil de índice gradual (B) [7]

A parte de las condiciones mencionadas en el apartado anterior, para que tuviese lugar la *Reflexión Total Interna* y el *Confinamiento Óptico*, en este tipo de guías será imprescindible que el índice de refracción del sustrato sea mayor que el de la cubierta, lo que se resume en $n_f > n_s > n_c$. Por otro lado, también será preciso que el grosor de la capa depositada sea superior a un grosor crítico. De esta forma sería posible que la luz pueda ser guiada. Finalmente, recalcar que en estos casos, el confinamiento óptico se produce únicamente en la dirección x de la Figura (3), por lo que la luz será guiada también en esa dirección. El hecho de que sea solo

en una dirección es lo que hace que se denominen planas.

- **Guías Ópticas Acanaladas (3D) [7]:** Muchas veces lo que se requiere son guías ópticas en 3D. Esto es así porque este tipo de guías permiten un mejor control de los modos guiados. Este control se puede hacer de forma más eficiente porque estas guías permiten el confinamiento óptico en más de una dirección. En concreto, en el caso de las guías en 2D este confinamiento era solo posible en la dirección x , pero en el caso de guías acanaladas, el confinamiento óptico se da tanto en la dirección x como en la dirección y . De esta manera se podrá conseguir una modulación y unos cambios eficientes en la luz, controlando los modos guiados, evitando dispersión de la luz debida a la difracción. Las guías ópticas acanaladas están divididas a su vez en diferentes tipos, como por ejemplo, las *enterradas en el sustrato* o las *tipo cresta*, entre otras:

1. Guías Ópticas enterradas en el sustrato (*Buried Type*): Son las mostradas en la Figura (5 (A)). En este tipo de guías la capa sobre el sustrato se deposita de diferentes maneras, entre las que se incluye la difusión de un metal en el sustrato, por intercambio iónico o por irradiación con un haz de luz o electrones. Su ventaja principal es que la pérdida de intensidad en la propagación es muy baja.
2. Guías Ópticas Tipo Cresta (*Ridge Type*): Se puede apreciar su forma, de manera esquemática en la Figura (5 (B)), en la que se ve una elevación, en vez de un hundimiento, a diferencia de las anteriores. Este tipo de guías, que son muy útiles para guías de onda curvadas, con muy poco radio de curvatura, se fabrican quitando la capa con el índice más alto del sustrato mediante grabado en seco.

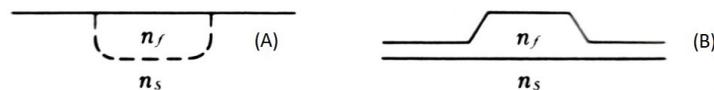


Figura 5: Buried Type (A) y Ridge Type (B) [7]

Finalmente, destacar que este tipo de guías pueden ser *monomodo* o *multimodo*, en función de si permiten la propagación de un solo modo específico o si se pueden propagar varios.

2.1.3. Condiciones del Guiado de la Luz. Modos de la Guía

Los modos guiados se refieren a las diferentes formas en las que se puede propagar la luz dentro de la guía. Cada modo lo determinará la estructura que tenga la guía en cuestión. De una manera más

concreta, la forma de estos modos viene dada por una distribución del campo eléctrico y magnético característica de cada tipo de guía, donde cada uno de ellos tendrá unas frecuencias, intensidades y direcciones de propagación asociadas.

Como los modos guiados dependen del tipo de guía, se analizarán más en profundidad en función de ellas [5] [7]:

- **Guías Ópticas Planas (2D):** En este caso, se habían considerado dos tipos diferentes, las de índice de salto y las de índice gradual.

Comenzando con las que tienen índice de salto, se pretende llegar a una situación similar a la de la Figura (2). Para ello, serán necesarias una serie de condiciones, algunas ya mencionadas. Es preciso recordar que se necesita que se produzca el confinamiento óptico, por tanto, si se parte de que incide un haz de luz coherente sobre una de las intercaras, con ángulo de incidencia con respecto a la normal θ_i , los ángulos críticos, a partir de los cuales se produce reflexión total en ambas separaciones entre medios (núcleo-sustrato y núcleo-cubierta), vienen dados por (3). Una vez recordado esto, se debe tener en cuenta que, en general, el índice de refracción del sustrato es mayor que el de la cubierta ($n_s > n_c$), entonces, generalmente, se tendrá que el ángulo crítico en la intercara inferior (sustrato) será mayor que el ángulo crítico en la intercara superior (cubierta), es decir, $\theta_{c,s} > \theta_{c,c}$. Basándose en esto último, se pueden dar diferentes casos en función de cuál sea el ángulo de incidencia:

1. $\theta_{c,s} < \theta_i < 90^\circ$: En este caso (Figura (6)), se puede apreciar que la luz presenta reflexiones totales internas en las dos superficies de separación entre medios, y por tanto, se encuentra confinada y se propaga en el núcleo de la guía.

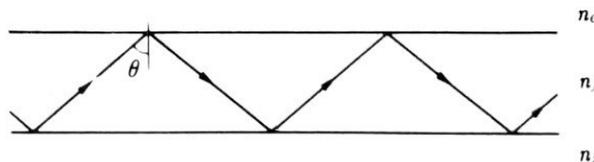


Figura 6: Modo Guiado. $\theta_{c,s} < \theta_i < 90^\circ$ [7]

2. $\theta_{c,c} < \theta_i < \theta_{c,s}$: En este segundo caso (Figura (7)), lo que se aprecia es que la luz sí que sufre la reflexión total interna en la superficie de separación entre el núcleo y la cubierta, sin embargo, hay parte de luz que es radiada a través del sustrato. Esto se debe a que al ser

el ángulo de incidencia menor que el crítico para el sustrato, por la Ley de Snell, se tendrá una parte de la luz refractada. En este caso no tiene lugar el confinamiento óptico.

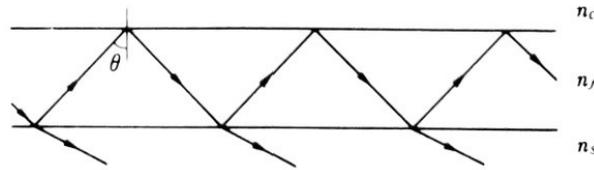


Figura 7: Modo Radiado del Sustrato. $\theta_{c,c} < \theta_i < \theta_{c,s}$ [7]

3. $\theta_i < \theta_{c,c}$: En el último caso (Figura (8)), es posible observar que, tal y como pasaba en el caso anterior en una sola intercara, la luz será transmitida hacia los dos medios que rodean el núcleo de la guía. Es decir, no se produce la reflexión total en ninguna de las dos intercaras, por lo que aparecerán modos radiados en el sustrato y en la cubierta.



Figura 8: Modo Radiado de la guía (Sustrato y Cubierta). $\theta_i < \theta_{c,c}$ [7]

Una vez analizados los diferentes casos, se puede concluir que para que la luz sea guiada es necesario que se dé el primero de los casos. De esta manera se cumplirá la condición de *Reflexión Total Interna* y se conseguirá el *Confinamiento Óptico*. Aún así, cabe resaltar que esta condición es necesaria pero no suficiente para el guiado de la luz [5].

Las diferentes ondas estacionarias que viajan por el núcleo de la guía, fruto de las reflexiones totales en las intercaras, deben cumplir una serie de condiciones para que, al interferir entre ellas, se genere un patrón de interferencia de forma que la luz esté guiada. Si se quiere el guiado de la luz, será necesario que los campos tengan la misma polarización y distribución transversal a lo largo de la dirección de propagación. Así, es posible saber que se transportará potencia en la dirección de propagación, además de esperar obtener a la salida de la guía la misma distribución del campo que había a la entrada.

Para llegar a los resultados deseados, se pueden obtener las condiciones de forma analítica, partiendo de la imagen de la Figura (9). Donde se están teniendo en cuenta las características de la propagación de las ondas planas. Una de ellas es la constante de propagación, mostrada en la imagen como $k_0 n_f$ (con $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ y λ la longitud de onda), que da información sobre la dirección y el sentido de propagación de la onda. Esta constante puede relacionarse con el ángulo de incidencia en la intercara descomponiéndola en sus componentes espaciales. De esta forma:

$$\left. \begin{aligned} k_x &= k_0 n_f \cos \theta_i \\ k_z &= k_0 n_f \sin \theta_i = \beta \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Donde β se corresponde con la constante de propagación de la onda en un medio considerado infinito y con índice de refracción $n_f \sin \theta_i$. A partir de esto último se pueden definir los índices efectivos de los modos (N), en el rango de ángulos que marcaba la primera condición ($\theta_{c,s} < \theta_i < 90^\circ$). Así pues, N viene dada por la siguiente expresión:

$$\beta = k_0 N \rightarrow N = n_f \sin \theta_i \quad (5)$$

Sustituyendo los valores de θ_i para que cumplan la condición, el valor de N quedará acotado de la siguiente manera (recordando que $n_c < n_s$):

$$n_s < N < n_f \quad (6)$$

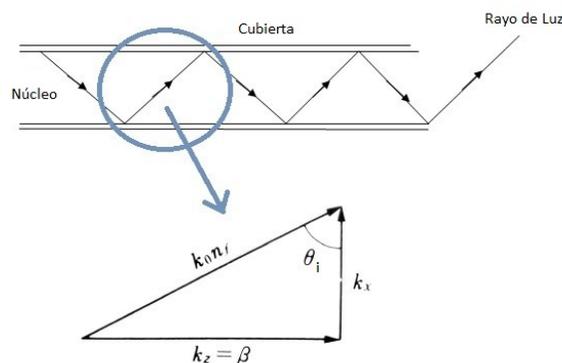


Figura 9: Esquema vector de onda [6] [7]

Una vez conocida la forma de la constante de propagación de la onda, sus componentes y la definición de los índices efectivos, queda saber cómo será la propagación de las mismas. Para

ello es necesario tener en cuenta cuál es la forma de los campos, eléctrico y magnético, para la situación deseada. Por tanto, se deben tener en consideración las ecuaciones de Maxwell (7) (8), para las condiciones expresadas previamente y teniendo en cuenta que el medio es dieléctrico e isotrópico [7].

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (7)$$

$$\nabla \times \vec{H} = -\epsilon_0 n^2 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (8)$$

Si se supone que la onda plana se propaga a lo largo del eje z con constante de propagación β , se tiene que el campo eléctrico y magnético varían de acuerdo a:

$$\vec{E} = E(x, y) \cdot e^{i(\omega t - \beta z)}$$

$$\vec{H} = H(x, y) \cdot e^{i(\omega t - \beta z)}$$

Con esa definición de \mathbf{E} y de \mathbf{H} , sabiendo que ambos no tienen dependencia en la dirección y ($\frac{\partial}{\partial y} = 0$) y empleando las expresiones (7), y (8) se obtienen dos modos ortogonales, el transversal eléctrico (TE) y el transversal magnético (TM).

1. Modo Transversal Eléctrico:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + (k_0^2 n^2 - \beta^2) E_y &= 0 \\ H_x &= -\frac{\beta}{\omega \mu_0} E_y \\ H_z &= -\frac{1}{i\omega \mu_0} \frac{\partial E_y}{\partial x} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

2. Modo Transversal Magnético:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + (k_0^2 n^2 - \beta^2) H_y &= 0 \\ E_x &= \frac{\beta}{\omega \epsilon_0 n^2} H_y \\ E_z &= \frac{1}{i\omega \epsilon_0 n^2} \frac{\partial H_y}{\partial x} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

De las expresiones en (9) y (10) se puede obtener una solución para la forma de los campos E_y y H_y , resolviendo una serie de ecuaciones de autovalores y teniendo en cuenta las condiciones de contorno existentes en $x = 0$ (límite superior del núcleo) y en $x = -T$ (límite inferior del

núcleo), siendo T el espesor del núcleo. Entre estas condiciones se encuentra la de la continuidad de las componentes tangenciales de E y H en cualquier intercara con un índice discontinuo, es decir en $x = 0, -T$, entre otras.

Las condiciones de contorno impuestas se van a satisfacer si al desplazarse en x , el desfase para un punto en concreto es el mismo cuando se vuelve a pasar por ese punto, es decir, el desfase que se va acumulando es múltiplo de 2π [5]. Concretando un poco (Figura (10)), se puede tomar como referencia un punto cualquiera, P , cuya distancia al límite superior es d y su desfase en la reflexión total, ϕ_c . Como se quiere volver a ese punto, será necesario que se produzca la reflexión total en la otra intercara. Al venir de reflejarse en la primera, la distancia recorrida será igual al espesor del núcleo, T , y se denominará a su desfase en este caso, ϕ_s . Para volver al punto P , aún necesitará la onda recorrer una distancia $T - d$. La componente de k en la dirección x era $k_0 n_f \cos \theta_i$, sumando todos los recorridos y los desfases en x e imponiendo la condición se tiene que:

$$k_0 n_f \cos \theta_i \cdot d - \phi_c + k_0 n_f \cos \theta_i \cdot T - \phi_s + k_0 n_f \cos \theta_i \cdot (T - d) = 2\pi m \quad (11)$$

Simplificando,

$$2k_0 n_f \cos \theta_i \cdot T - \phi_c - \phi_s = 2\pi m \quad (12)$$

Esta última condición se conoce como *Condición de Resonancia Transversal* y es necesaria para que se propaguen los modos TE y TM en las guías ópticas planas.

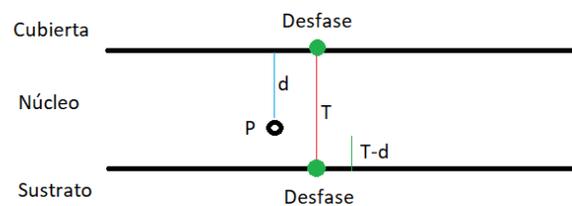


Figura 10: Esquema Recorrido de ida y vuelta a un punto [5]

Considerando todas esas condiciones, es posible resolver las ecuaciones, que dan lugar a las siguientes distribuciones para los modos guiados TE y TM (representados para diferentes valores de m crecientes) (Figura (11)).

En el caso de las que tienen índice gradual en vez de índice de salto, las condiciones para los modos guiados son las mismas, la única diferencia está en la forma de las expresiones para n

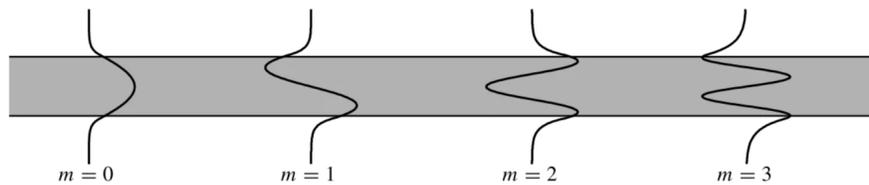


Figura 11: Distribución modos guiados: TE (similar para TM) [9]

(que experimenta un cambio progresivo, no tiene un valor fijo) y los campos. En concreto, para este tipo de guías, la ecuación de ondas no va a venir dada por (9), sino que se expresará de la siguiente manera:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + (k_0^2 n(x)^2 - \beta^2) E_y = 0 \quad (13)$$

Donde $n(x)$ es la distribución que sigue el índice de refracción. La única manera de resolver, de forma analítica, las ecuaciones en este caso, es que el índice de refracción varíe de forma exponencial con x . Si esto no ocurriera, se emplean métodos alternativos para llegar a soluciones aproximadas. Algunos de los métodos que se pueden emplear son el *Método de Aproximación por Rayos*, el *Método WKB*, etc.

- **Guías Ópticas Acanaladas (3D)** [7]: En este tipo de guías, salvo alguna excepción en la que sí pueden aparecer modos *Transversales Eléctricos* y *Transversales Magnéticos* puros, generalmente los modos que aparecen son una mezcla de ambos. La polarización de estos modos es en las direcciones x e y , y se denominan *Transversales Electromagnéticos* o TEM.

La clasificación de estos modos se hace teniendo en cuenta si la componente principal del campo eléctrico va en la dirección x o en la dirección y . En concreto se distingue entre un modo que se asemeja al TM de las guías planas y otro que se asemeja al TE. Estos son, respectivamente, el modo E_{pq}^x , que tiene su componente principal del campo eléctrico sobre la dirección x y el modo E_{pq}^y , cuya componente principal del campo E se encuentra en la dirección y . Siendo p el número de nodos del campo eléctrico en la dirección x y q exactamente lo mismo, pero en la dirección y .

La solución al problema para guías ópticas acanaladas, en general se suele resolver empleando métodos que aproximen la solución. Entre ellos se encuentran el *Método de Marcatili* y el *Método del índice efectivo*.

2.2. Diseño y Fabricación de Guías Ópticas

Uno de los procesos principales a la hora de poder implementar y sacar el mayor rendimiento posible a todas las propiedades y características de las guías ópticas, en sus diversas y numerosas aplicaciones, es partir de un diseño adecuado a las necesidades, y la utilización de diferentes técnicas de fabricación, también idóneas, para poder cumplir el objetivo.

Cabe destacar que, actualmente, es un campo con numerosas investigaciones activas. Por lo tanto, se están desarrollando y buscando continuamente mejoras en los diseños y la fabricación, intentando optimizar al máximo los procesos y los resultados. En concreto, se busca aumentar la eficiencia; aminorar, por tanto, las pérdidas; reducir los tamaños; obtener una mejora en las capacidades de integración en circuitos; etc.

Esencialmente, lo que se busca en los procesos de diseño y fabricación es adecuar las guías, junto con los demás componentes involucrados, para llegar a un resultado óptimo y útil en las diferentes aplicaciones y/o avances tecnológicos que permiten este tipo de dispositivos (comunicaciones, detección, computación, ...). Así pues, los diseños se centrarán en adaptar a las distintas aplicaciones los materiales para fabricarlas, las formas, tipos y dimensiones, los perfiles de índice, etc.

2.2.1. Técnicas de Fabricación

En esta sección se pretende discutir algunas de las técnicas a partir de las cuales se fabrican diferentes tipos de guías ópticas [7]. Cada una de ellas será empleada para obtener los distintos tipos de guías, fabricadas con diferentes materiales y con con distintas funcionalidades. Generalmente, la decisión de la técnica a utilizar dependerá, en cada caso, de las características deseadas para la estructura y forma de la guía, que a su vez estarán condicionadas por la aplicación a la que esté destinada.

Algunas de las principales técnicas empleadas son [7]:

- **Recubrimiento por Centrifugado o Giro y Recubrimiento por Inmersión** (*Spin and Dip Coating*): Las dos técnicas consisten, básicamente, en depositar, sobre un sustrato, finas capas de algún material disuelto como, por ejemplo, fotorresinas. En el caso del *Recubrimiento por Centrifugado o Giro* la capa fina se deposita sobre el sustrato haciendo girar, rápidamente, este último (Figura (12, caso (A))). En el caso del *Recubrimiento por Inmersión*, la capa fina se

deposita sumergiendo, y volviendo a sacar, el sustrato en la disolución que contiene la fotorresina (Figura (12, caso (B))). Posteriormente, para los dos procesos, será preciso someter a los sustratos, ya recubiertos, a un proceso térmico. De esa forma, y empleando las temperaturas adecuadas, las fotorresinas estarán mejor adheridas a los sustratos.

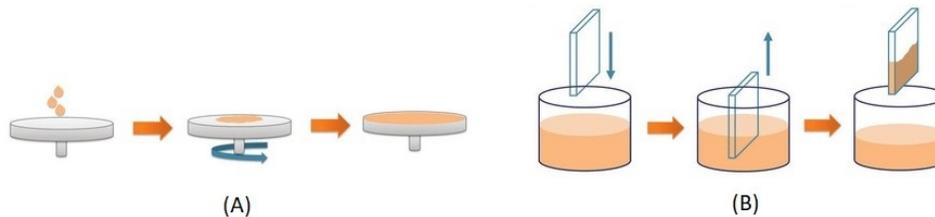


Figura 12: Esquema de las técnicas: Spin Coating (A) y Dip Coating (B) [10]

- Deposición Térmica en Fase Vapor (*Thermal Vapor Deposition*):** Esta técnica consiste, de nuevo, en depositar una fina capa de un material sobre un sustrato. En este caso, para conseguir esa fina capa, se depositará un material evaporado dentro de una cámara de vacío (a unas condiciones de presión determinadas) (Figura (13)). Para la evaporación del material se emplean diferentes técnicas de calentamiento, que dependerán del punto de fusión que tenga el material. Si el punto de fusión del material es bajo, se calentará con una *resistencia eléctrica*, mientras que si el punto de fusión es alto se empleará el *calentamiento por haz de electrones*. En cualquier caso, el sustrato ha sido calentado previamente, para así favorecer que se adhiera mejor el material a él, la temperatura de precalentamiento suele ser de 200 °C. El espesor de la capa de material depositada en el sustrato va a depender de la distancia a la que se encuentre éste y del tiempo que esté expuesto, obteniendo una mejor uniformidad en la deposición si la distancia es mayor.

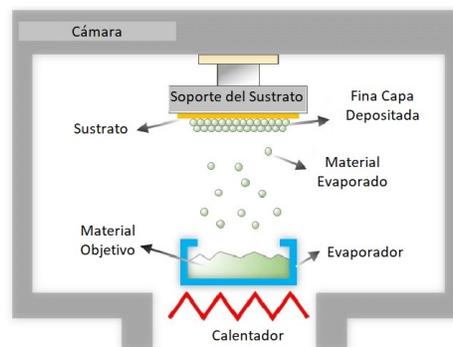


Figura 13: Esquema de la técnica: Thermal Vapor Deposition [11]

- Deposición por Pulverización Catódica (Sputtering):** Esta técnica consiste en bombardear un material objetivo con iones positivos de un gas determinado (Ar, Ne, Kr). Estos iones al llegar al material objetivo liberan partículas (átomos y moléculas) de él, que posteriormente acabarán depositándose en el sustrato para formar una fina capa sobre éste. Es una técnica que se suele emplear cuando los materiales tienen puntos de fusión muy altos y el calentamiento térmico no resulta óptimo. Es preciso resaltar que esta técnica ofrece unas capas más puras, fuertes y uniformes que las obtenidas mediante el método anterior.

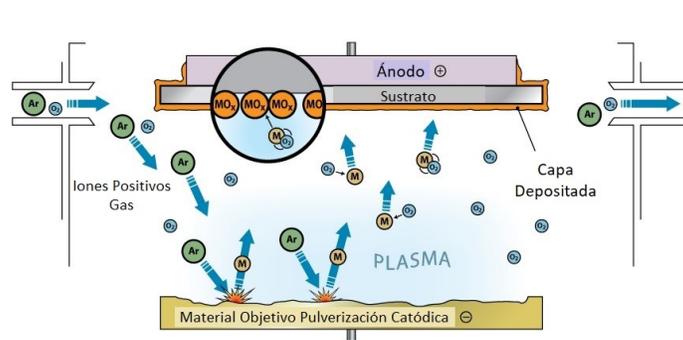


Figura 14: Esquema de la técnica: Sputtering [12]

- Deposición Química en Fase Vapor (Chemical Vapor Deposition - CVD):** A parte de procesos físicos para depositar las finas capas en los sustratos, también pueden emplearse procesos químicos. En este caso lo que ocurre es una reacción química de ciertos gases. Principalmente, se introducen los reactivos químicos, para que reaccionen bajo una serie de condiciones determinadas (entre las que se incluyen temperatura y presión). Los productos de dicha reacción acaban depositándose sobre el sustrato, dando lugar a la fina película de material deseada.

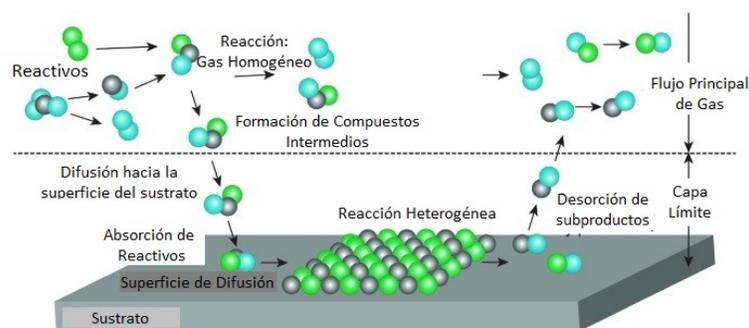


Figura 15: Esquema de la técnica: Chemical Vapor Deposition (CVD) [13]

- **Polimerización** (*Polymerization*): Esta técnica se emplea para formar finas capas de polímeros sobre el sustrato. Para ello, primero es necesario depositar los monómeros sobre el sustrato, con alguna técnica como la segunda expuesta. Mientras está teniendo lugar la deposición, se polimerizará calentándolo de diferentes maneras, por ejemplo, con haces de electrones, con luz ultravioleta, etc. Este es un proceso que se puede controlar de forma muy precisa.
- **Difusión Térmica** (*Thermal Diffusion*): Esta técnica puede realizarse de diferentes formas. Una de ellas, consiste en colocar el material que se quiere difundir sobre el sustrato. Posteriormente, para su difusión, será necesario mantenerlo a alta temperatura, resultando en una fina capa sobre el sustrato. Cabe resaltar que con este método el perfil de índice no será de salto, sino que se apreciará un perfil de índice gradual. Otra forma de llevar a cabo este método es realizando la difusión del material fuera de la superficie del sustrato. Además, existe una tercera forma de proceder, que consiste en emplear un campo eléctrico para la difusión. El material se difundirá más rápido y a una temperatura menor debido a que se le estará aplicando un campo eléctrico durante el proceso de difusión. Esta última manera de proceder, resultará útil si se quiere que el sustrato no se caliente a temperaturas muy altas.

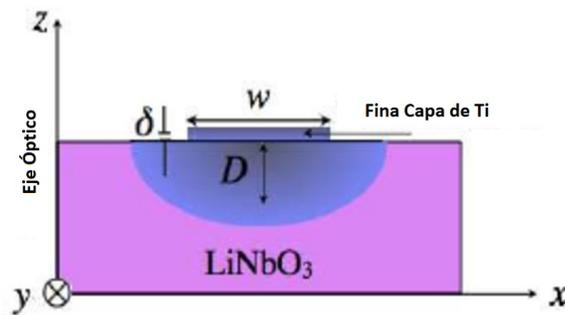


Figura 16: Esquema del perfil de una guía fabricada por difusión [14]

- **Intercambio Iónico** (*Ion Exchange*): Como las técnicas anteriores, consiste en formar una fina capa, de un material con mayor n que el sustrato, sobre este último. Para ello, en este caso, se generará un intercambio entre iones de ambos materiales, para llegar al resultado deseado. El sustrato se introduce en un disolvente y los iones presentes en el sustrato se intercambiarán con los presentes en el disolvente. Este intercambio alterará el índice de refracción, permitiendo así la formación de la guía. En ocasiones también se aplica un campo eléctrico, que permitirá acelerar el proceso de intercambio. Por ejemplo, algunos de los iones utilizados en esta técnica pueden ser los empleados en el intercambio de Na^+ por iones como Ag^+ o K^+ .

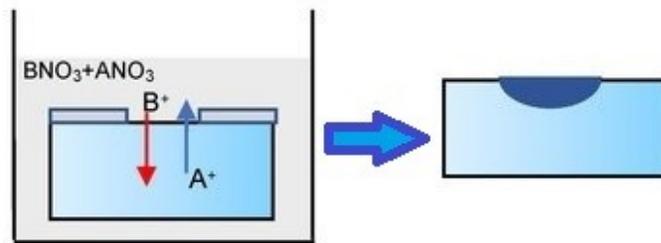


Figura 17: Esquema de la técnica: Ion Exchange [15]

- Implantación Iónica (Ion Implantation):** En este caso, la técnica consiste en implantar iones de un material en otro material objetivo. En la implantación iónica lo que se hace es acelerar iones que se van a dirigir hacia el sustrato para implantarse en él. De esta manera, se irá generando esa fina capa, con un índice de refracción mayor, sobre dicho sustrato. El dispositivo para realizar este tipo de técnica consiste en generadores de iones, en aceleradores, separadores de iones y deflectores de barrido. Empleando los dispositivos anteriores, se podrá controlar de forma bastante precisa la distribución seguida en la implantación de los iones sobre el sustrato.

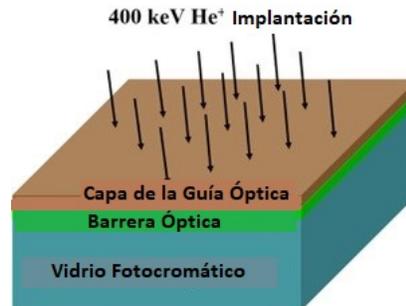


Figura 18: Esquema de la técnica: Ion Implantation [16]

- Crecimiento Epitaxial (Epitaxial Growth):** Para llevar a cabo esta técnica será necesario tener un material con una estructura cristalina y una constante de red similar a la que posea el sustrato. Si el material está en fase líquida o gaseosa y es puesto en contacto con la superficie del sustrato, acabará cristalizando y formando una fina capa sobre el mismo. Esta capa suele tener una buena cristalización y uniformidad, además de ser posible controlar bien el grosor de la misma. En este caso el perfil de índice no será gradual, sino que se tendrá un perfil de índice de salto. Este método puede realizarse con el material en fase líquida y se denominará **LPE (Liquid Phase Epitaxy)**, o con el material en fase gaseosa, en este caso recibe el nombre de **VPE (Vapor Phase Epitaxy)**.

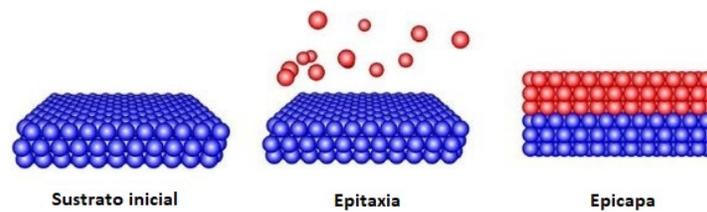


Figura 19: Esquema de la técnica: Epitaxial Growth [17]

Es preciso mencionar que estas técnicas/métodos expuestos son solo algunos de los que se emplean para fabricar una guía óptica, pero existen más métodos que se pueden utilizar para cumplir el objetivo. Básicamente, todos ellos consisten en generar una fina capa de un material con índice de refracción mayor que el índice de refracción que tenga el sustrato, para así poder alcanzar las condiciones necesarias en la estructura que permitan denominarla guía óptica.

2.2.2. Tipos de Materiales en Guías Ópticas

Los materiales empleados para la fabricación de las guías ópticas dependerán de las características que se requieran para su aplicación. Es importante tener en cuenta que la elección de los materiales empleados suele resultar clave para múltiples factores. Cada tipo de material tiene unas propiedades físicas y, también, ópticas diferentes, por lo que el empleo de un material u otro vendrá determinado por el tipo de propiedades y características que se deseen. Algunas de las características más relevantes suelen ser el índice de refracción del material, que influirá en la velocidad de propagación, en la mejor o peor capacidad para el confinamiento de la luz, ... ; otra de las características relevantes son las pérdidas que se produzcan al viajar la luz por la guía y en relación con ello, lo eficiente que es dependiendo del material empleado; también serán relevantes otras propiedades como la transparencia, la resistencia mecánica o térmica, la adecuación del material a una aplicación concreta, la disponibilidad del mismo o el aspecto económico, entre otros muchos condicionantes.

Algunos de los materiales de fabricación de las guías, junto con una breve exposición de sus características y de las técnicas empleadas para fabricarlas, viene desarrollado a continuación [7]:

- **Polímeros:** Existen numerosos polímeros con los que se pueden fabricar guías ópticas. Entre ellos destacan el poliuretano, las resinas epoxi, las fotorresinas o el polimetilmetacrilato. Este tipo de material permite la fabricación de guías tanto *monomodo* como *multimodo*, todas ellas se hacen disolviendo el material en un disolvente apropiado, por lo que las principales

técnicas de fabricación serán el *Recubrimiento por Centrifugado* o el *Recubrimiento por Inmersión*, respectivamente. En el primero de los casos, será posible controlar el grosor de la capa depositada atendiendo tanto a la viscosidad del material como a la velocidad de rotación. En el segundo de los casos, el grosor de la capa puede controlarse empleando separadores para ajustar el espacio a la hora de sumergir el sustrato.

Algunas de las características que presentan las guías ópticas fabricadas con este tipo de material son que sus pérdidas se deben, principalmente, a pérdidas por absorción intrínseca o por dispersión superficial (debida a las rugosidades que presenta la misma). Para disminuir estas pérdidas será preciso obtener capas con superficies más lisas. Las pérdidas, en general y exceptuado algunos casos, suelen ser bajas, incluso en torno a 1 dB/cm en algunos de estos materiales, por lo que se favorece un buen guiado. Además, otro de sus puntos a favor es que siguen un proceso de fabricación sencillo y no muy costoso. En contraposición, este tipo de guías pueden no resultar muy útiles para algunas aplicaciones debido a la gran dependencia que tienen estos materiales con la temperatura.

- **Vidrio:** Otro de los materiales con los que se pueden fabricar guías ópticas es el vidrio, se trata de un material isotrópico y muy utilizado en aplicaciones ópticas. En general, se obtienen guías ópticas con pérdidas bajas y de fácil fabricación. Entre los tipos de vidrio utilizados para sustratos se encuentran el vidrio *soda lime* o vidrio común (cal sodada), el vidrio borosilicatado (o *vidrio pyrex*) y el vidrio de cuarzo fundido.

En cuanto a las técnicas de fabricación, pueden emplearse varias de ellas:

1. **Intercambio Iónico:** Uno de los métodos empleados es el *intecambio iónico*, con él es posible controlar el índice de refracción con la densidad del vidrio, la polarizabilidad de los iones presentes y la composición del material. Estos vidrios, a parte de su composición principal (SiO_2 , B_2O_3), contienen una serie de óxidos (Na_2O , K_2O , CaO , ...), estos óxidos al calentarse se ionizan y los iones formados se acaban intercambiando con otros más ligeros como el Na^+ , formando así la fina capa con índice de refracción superior al del cristal original. Este proceso, como ya se mencionó en (2.2.1), también es posible acelerarlo con la aplicación de un campo eléctrico, de esta forma será posible controlar la densidad de iones, que será constante a una profundidad determinada, y será dependiente del tiempo del intercambio y de la movilidad de los iones.

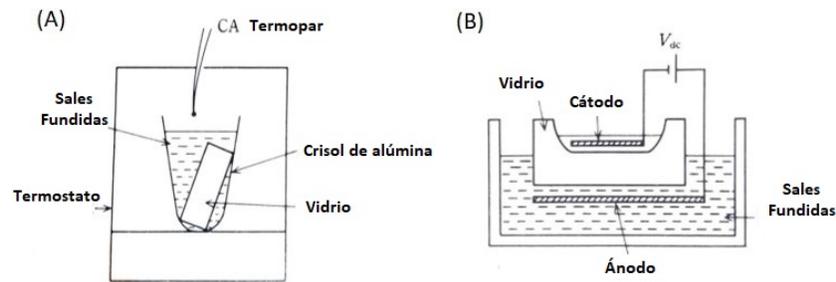


Figura 20: Esquema del intercambio iónico entre un sustrato de vidrio y sales fundidas [7]

2. **Deposición por Pulverización Catódica:** Otro de los métodos que se puede emplear con este tipo de materiales es el *sputtering*. En general, las finas capas que se pretenden obtener, se depositan empleando fuentes de alimentación de radiofrecuencia entre el sustrato y el objetivo. Además, esto ocurrirá dentro de un ambiente de argón, sometido a presiones determinadas. De esta forma, se generarán los iones a partir del material objetivo, que en este caso será un vidrio (principalmente SiO_2). La composición y características de las capas formadas van a diferir de las del vidrio original y dependerán de la presión del gas de Ar y de la potencia de la señal de radiofrecuencia suministrada.

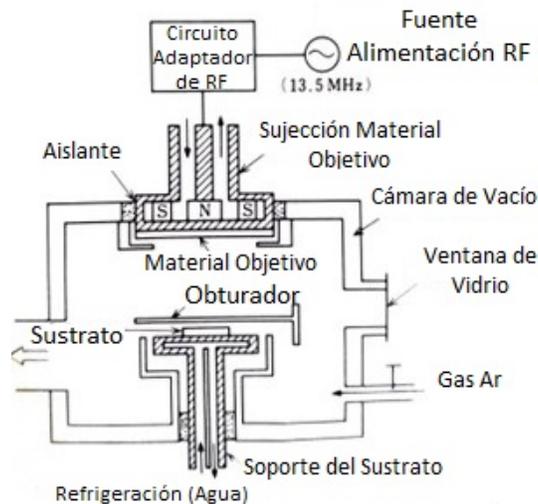


Figura 21: Esquema de un sistema de Sputtering [7]

3. **Deposición Química en Fase Vapor - CVD:** Por último, otro método empleado para este tipo de materiales es la *deposición química*. Esta técnica puede emplearse para la obtención de guías de vidrio con pérdidas muy bajas. En cuanto a los materiales que se suelen emplear, se tiene que el sustrato generalmente es de cuarzo fundido y entre los gases

que sufren una reacción de oxidación se encuentran el O_2 , el $SiCl_4$, el BBr_3 y el $GeCl_4$.

- **Calcogenuro Amorfo:** Al emplear calcogenuros como material de fabricación de las guías, existen una serie de características que resultan ventajosas, y que principalmente derivan del hecho de estar utilizando un material amorfo. Algunas de estas características son la fácil fabricación de capas amplias y bien uniformes; la buena adaptación de las constantes ópticas, como por ejemplo el índice de refracción, a los valores deseados; pérdidas en la transmisión muy bajas; la posibilidad de utilizar muchos tipos diferentes de materiales para el sustrato, ya que el índice de refracción del núcleo de la guía es bastante alto, etc. Las aplicaciones empleando este tipo de materiales son numerosas, no solo para guías ópticas en sí, sino que también para circuitos ópticos integrados. Entre los componentes que destacan se encuentran el S, Te, Se, As, Ge, ... En general este tipo de guías son propicias para utilizarse en el rango del infrarrojo.

Entre los métodos de fabricación que se utilizan para este material, se encuentran la *deposición térmica en fase de vapor*, evaporándose el material dentro de una cámara de vacío y la *deposición por pulverización catódica o sputtering* de radiofrecuencia. Normalmente los calcogenuros son los materiales evaporados u objetivo en las dos técnicas anteriores, respectivamente. A parte de emplearse para la formación del núcleo de las guías, también pueden ser utilizados para las cubiertas (*o cladding*). En general, para los sustratos se pueden emplear vidrios, por ejemplo cuarzo fundido, o cristales como el $LiNbO_3$. Las características de las guías de calcogenuro, entre las que se incluyen las pérdidas, dependen de la longitud de onda que se utilice, la composición de la capa depositada y del sustrato. No suelen ser dependientes del proceso de fabricación empleado, aunque el cambio en el índice de refracción si que depende de éste.

- **$LiNbO_3$:** Otro tipo de guías ópticas son las fabricadas a partir de $LiNbO_3$, este tipo de guías tiene unas propiedades electroópticas muy buenas y fabricar guías con pérdidas por transmisión bajas es relativamente sencillo. En cuanto a los métodos de fabricación empleando $LiNbO_3$ existen varios, algunos de ellos son:

1. **Crecimiento Epitaxial:** En este caso crecería un cristal de $LiNbO_3$ sobre un cristal de $LiTaO_3$, que tiene la misma estructura cristalina.
2. **Deposición por Pulverización Catódica - Sputtering:** Se depositará la fina capa de $LiNbO_3$ sobre un sustrato de vidrio.
3. **Difusión Térmica:** Se puede realizar de formas distintas. Una de ellas consiste en calentar el $LiNbO_3$, en torno a $1000\text{ }^\circ\text{C}$, en un ambiente de vacío. De esta forma, se difundirá desde

la superficie del material Li_2O , dando lugar a una capa con índice de refracción mayor cerca de la superficie. La otra manera consiste en la deposición sobre el LiNbO_3 de una fina capa, debido al calentamiento, también en torno a los $1000\text{ }^\circ\text{C}$, de un gas inerte como el Ar, el N_2 o el O_2 .

4. **Intercambio Iónico:** Se producirá el intercambio iónico introduciendo el LiNbO_3 en sales fundidas, como por ejemplo AgNO_3 .

En general, las propiedades deseadas de la guía o las propiedades electroópticas pueden ajustarse variando el grosor de las capas depositadas. Cada uno de los métodos ofrece unas propiedades ópticas ligeramente diferentes, por lo que la elección de uno u otro vendrá determinada por la aplicación a la que sea destinada la guía.

2.3. Caracterización de Guías Ópticas

La caracterización de las guías ópticas es una de las partes más relevantes en el diseño, fabricación, análisis y estudio de las mismas. Principalmente, consiste en medir diferentes características y/o valores de las guías que permitan conocer o estimar su rendimiento y demás comportamientos esperados en las diferentes aplicaciones. Es decir, con la caracterización se pretende confirmar que la guía muestra, en las medidas, las mismas características que se pretendían obtener con su diseño.

Se suelen medir diferentes características de las guías, algunas de las principales mediciones incluyen el índice de refracción y su perfil, su espesor, los modos de propagación de la guía en particular, la mejor forma de acoplar la luz en el sistema estudiado, las pérdidas de la misma y su rendimiento, o propiedades no lineales. En esencia, la evaluación de este tipo de parámetros sirve como retroalimentación en el proceso de diseño y fabricación, ya que permitirá modificar estructuras, materiales, técnicas, ... con el fin de obtener un rendimiento óptimo.

La medida del índice de refracción y su perfil, permitirá conocer cómo la luz interactúa con el material que recubre el núcleo de la guía y cómo se propaga por éste, ya que con él es posible conocer la velocidad a la que se está propagando la luz y cómo son sus reflexiones. Es necesario, también, ver cuál es la eficiencia en el transporte de la luz, para ello se requerirá conocer las pérdidas que presenta la guía e incluso saber a qué se deben (pérdidas por absorción, difracción, dispersión,...), una vez conocidas será posible optimizar la guía para que las pérdidas sean las mínimas posibles. En cuanto a los modos guiados, lo que se pretende conocer es el patrón o patrones permitidos para propagarse la

onda dentro del núcleo, y por tanto la distribución de energía de la misma. A parte de esos parámetros fundamentales, el proceso de caracterización de la guía englobaba otros, ya mencionados, como las propiedades no lineales, que pretenden analizar el comportamiento no lineal que sigue cuando las intensidades empleadas son altas.

Es preciso destacar que, a parte de los índices de refracción y sus variaciones en las diferentes partes de la guía, hay otros factores que influyen en la propagación de la luz dentro de la guía. Algunos de ellos son la estructura que tenga la guía o el tamaño del núcleo de la misma, ambos son relevantes a la hora de confinar la luz dentro del núcleo. Otro de los puntos a destacar es que el aspecto y la forma de las estructuras puede afectar también a las pérdidas y la eficiencia. La rugosidad de las superficies va a ser muy relevante para esto último, ya que cuánto menor sea ésta y más lisas sean las superficies de la guía, menores pérdidas por dispersión tendrán lugar. El espesor de la guía también es un factor relevante en el guiado, hay que tener en cuenta que debe existir un espesor mínimo para que la luz se mantenga confinada y no se transmita al sustrato. Además, cabe resaltar que los modos de la guía, también serán dependientes del espesor de ésta. Por tanto, las características asociadas a las dimensiones serán importantes a la hora de optimizar en el proceso de diseño y fabricación.

2.3.1. Técnicas de Acoplamiento de la Luz en Guías Ópticas

Para poder cuantificar todas las características mencionadas anteriormente, es preciso que la luz se propague por el interior de la guía. Por otro lado, si se quieren cuantificar una serie de valores, se necesitará realizar algunas medidas. Estas medidas implican el hecho introducir la luz incidente dentro de la guía para, posteriormente, sacarla, llevándola hacia un receptor. Para ello, será preciso acoplar la luz en la guía siguiendo alguna de las técnicas que se especifican en este apartado; esto se va a deber a que el haz del láser posee un modo de radiación que no es posible que se propague directamente por la guía. En conclusión, lo que se pretende es utilizar alguna técnica que permita confinar y acoplar la luz del láser dentro de la guía óptica en cuestión.

Atendiendo a un enfoque más práctico [18], los factores que, principalmente, interesan a la hora de acoplar son la *eficiencia del acoplamiento* y la *selectividad del modo*. Normalmente, la eficiencia del acoplamiento (14) se expresa como el cociente entre la potencia acoplada en la guía y la potencia total que había antes de acoplar,

$$\eta_{cm} \equiv \frac{\text{Potencia acoplada en la guía}}{\text{Potencia total antes del acoplamiento}} \quad (14)$$

La expresión anterior se puede definir en términos de las pérdidas en el acoplamiento (expresadas en dB),

$$\mathcal{L}_{cm} \equiv 10 \log \frac{\text{Potencia total antes del acoplamiento}}{\text{Potencia acoplada en la guía}} \quad (15)$$

Es preciso destacar que, la eficiencia en el acoplamiento, principalmente, depende del grado de adecuación entre el modo guiado en particular y el campo del haz introducido en la guía. Otra apreciación que es necesario tener en cuenta es, que tanto la eficiencia del acoplamiento como su definición en pérdidas de intensidad, son válidas en el caso de estar introduciendo la luz en la guía y en el caso de estar extrayéndola.

Existen numerosas técnicas para alcanzar este propósito, algunas de las formas de acoplar la luz en una guía están explicadas a continuación [18]:

- **Enfoque Directo** (*Direct Focusing o End-Fire*): Este método es el más simple para acoplar luz dentro de una guía, en concreto es un tipo de acoplador transversal. Consiste en, aproximando el haz de luz, enfocarlo en la guía de forma directa, es decir, sin emplear otras estructuras como las que se usan en otras técnicas (rejillas, prismas, ...), intentando alinear el haz con la entrada de la sección transversal de la guía. El *enfoque directo* puede ser empleado con guías tanto planas como acanaladas. La eficiencia a la hora de intentar hacer coincidir el campo del haz con uno de los modos de la guía, y por tanto, la del acoplamiento, viene dada por la integral de la superposición de las formas o patrones que siguen el campo del haz incidente y el del modo de la guía:

$$\eta_{cm} = \frac{[\int A(x) B_m^*(x) dx]^2}{\int A(x) A^*(x) dx \int B_m(x) B_m^*(x) dx} \quad (16)$$

En la expresión anterior (16), $A(x)$ se corresponde con la distribución de amplitud del haz láser incidente y $B(x)$ es exactamente lo mismo pero con respecto al modo de la guía m (con $m \in 0, \mathbb{N}$).

Esta técnica es realmente útil para acoplar haces de láseres de gas a los modos fundamentales de la guía. Esto es porque el perfil gaussiano de estos haces incidentes se ajustan bastante bien al perfil del TE_0 , llegando, en la práctica, a eficiencias rondando el 60 %.

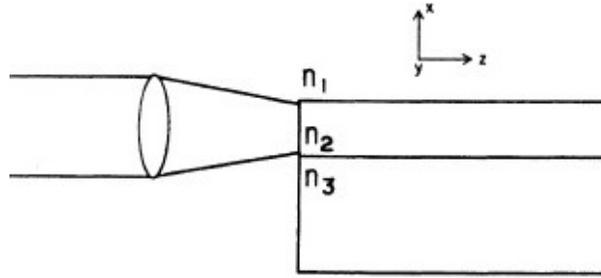


Figura 22: Esquema de la técnica Direct Focusing [18]

- Acoplamiento de extremo a extremo (End-Butt Coupling):** Esta técnica también pertenece al tipo de acoplamientos transversales. Consiste, principalmente, en aproximar mucho el final de dos guías ópticas, o el del haz incidente con el núcleo de una guía óptica, para así poder transferir la luz de un extremo al otro, buscando las menores pérdidas posibles. En general, se aproximan de forma paralela los extremos de las dos zonas por las que es propagada la luz. Normalmente, este tipo de acoplamiento suele ser muy eficiente en el caso de acoplar una guía con otra guía o en el caso de acoplar una guía plana con un diodo láser (semiconductor), porque con otros métodos es muy difícil conseguir una eficiencia óptima, ya que los primas, rejillas, etc, son muy sensibles al ángulo de incidencia y una pequeña variación genera grandes cambios a la hora de medir las pérdidas y la eficiencia. Si se busca conocer la eficiencia del caso más óptimo para este método, es decir, el del diodo láser acoplando en una guía de onda plana, y asumiendo que se realiza para el modo TE_0 , se tiene la siguiente expresión:

$$\eta_{cm} = \frac{64}{(m+1)^2 \pi^2} \frac{n_L n_g}{(n_L + n_g)^2} \cos^2 \left(\frac{\pi t_g}{2t_L} \right) \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{t_g}{(m+1)t_L} \right)^2 \right]^2} \frac{t_g}{t_L} \cos^2 \left(\frac{m\pi}{2} \right) \quad (17)$$

Los parámetros involucrados en la expresión anterior (17) son los índices de refracción y los espesores de ambos núcleos, los cuales se encuentran especificados en la Figura (23). Por otro lado, m es el orden del modo, que al igual que en el caso anterior, $m \in 0, \mathbb{N}$. Además, en cuanto a la expresión (17), hay que hacer otra serie de especificaciones. Se asume que todos los modos de la guía están bien confinados y que $t_g \leq t_L$. Por otro lado, se puede observar que no va a haber acoplamiento para valores impares de m , debido al último factor que involucra un coseno. Esto se puede traducir en que las distribuciones de los campos, al superponerse en esos casos, se cancelan entre ellas.

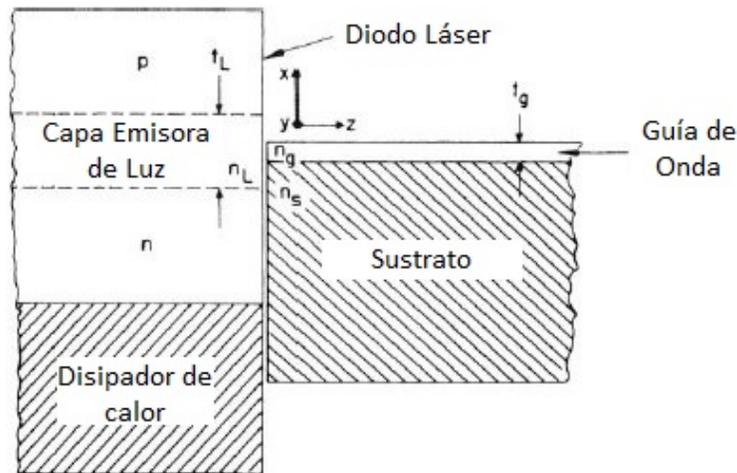


Figura 23: Esquema de la técnica End-Butt Coupling en paralelo [18]

Finalmente, otro de los factores a tener en cuenta es que el rendimiento de este tipo de acoplamiento va a ser máximo si el láser y la guía están perfectamente alineados. De no ser así, la eficiencia del acoplamiento, y por tanto la potencia medida, variará en función de cómo de desalineados se encuentren en las diferentes direcciones del espacio, en concreto en la dirección x y en la dirección z , mostradas en (23). La variación en la potencia, debido a la desalineación en el eje x , con un desplazamiento X de la guía con respecto al láser, viene dada por:

$$\frac{P}{P_0} = \cos^2 \left(\frac{\pi X}{t_L} \right) \quad (18)$$

Donde P_0 es la potencia medida para $X = 0$. Por último destacar que la alineación en el eje z debe ser muy precisa para evitar pérdidas, en concreto, para un buen acoplamiento, la precisión debe ser del orden de la longitud de onda.

- Acoplamiento por Prisma (Prism Coupling):** Este tipo de acoplamiento se emplea en casos en los que no pueden utilizarse métodos pertenecientes a los acoplamientos transversales, ya que estos últimos solo pueden llevarse a cabo si la sección transversal de la guía está descubierta. Cuando las guías ópticas están integradas en circuitos, el único lugar por el que se puede acoplar la luz es por su superficie, ya que solo esta parte está descubierta. Esto podría realizarse enfocando el haz de luz sobre la superficie de la guía con cierto ángulo, θ_m , tal y como se muestra en la Figura (24).

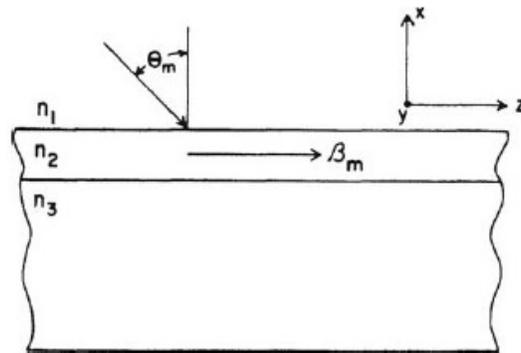


Figura 24: Esquema del intento de acoplamiento de la luz a través de la superficie [18]

Intentar acoplar la luz en la guía desde su superficie, tal y como se muestra en el diagrama anterior, da lugar a un problema. Para que se produzca el acoplamiento se requiere que las componentes z de las velocidades de fase, tanto del haz de luz como en la guía, sean iguales. Esto se resume en:

$$\beta_m = kn_1 \sin \theta_m = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_1 \sin \theta_m \quad (19)$$

Además, para que el modo sea guiado, se requiere que $\beta_m > kn_1$. Teniendo en cuenta esto último y la expresión (19), se tendría que dar que $\sin \theta_m > 1$, algo que, evidentemente, no es posible.

Para resolver este problema se pueden emplear distintos dispositivos que permitan que las componentes que se requiere que coincidan lo hagan. En este caso el dispositivo a utilizar será un prisma (25). Este prisma deberá tener un índice de refracción, n_p , mayor que el índice de refracción de la cubierta de la guía, n_1 , que en estos casos suele ser el aire. Además, sobre él deberá incidir un haz de luz con ángulo θ_m y anchura W . Se necesitará que el haz cumpla la condición de reflexión total interna dentro del prisma, creando, de esta manera, un modo de la onda dentro del prisma, con una constante de fase β_p . Por otro lado, dentro de la guía van a aparecer los diferentes modos guiados asociados a ella, se denominará a la constante de fase para el modo m , β_m (con $m = 0, 1, 2, \dots$). Tanto en los modos que aparecen en el prisma como en los de la guía, habrá una pequeña parte que se extenderá más allá de las zonas en las que está confinada la luz, y aparecerán unas especies de *colas evanescentes* en la región entre las intercaras del prisma y de la guía. Si el espaciado entre ambos (s) es lo suficientemente pequeño, estas colas de los modos guiados se podrán superponer. Para que el acoplamiento tenga lugar, además de cumplir lo anterior, será necesario que el ángulo de incidencia del haz sobre el prisma, θ_m , cumpla una condición; en concreto, para acoplar en el modo m , se ha de escoger θ_m de forma que $\beta_p = \beta_m$.

Así pues, la condición que se tiene es:

$$\frac{2\pi n_p}{\lambda_0} \sin \theta_m = \beta_m \quad (20)$$

Esta expresión viene dada bajo la condición de que el haz sea perpendicular a la superficie del prisma, en el caso de no fuera perpendicular se tendría que modificar (20). Es preciso notar que con el prisma se puede acoplar la luz en diferentes modos guiados, simplemente con cambiar el ángulo de incidencia del haz, θ_m , ya sería posible. Por otro lado, debido a que el prisma tiene unas dimensiones determinadas, la interacción entre los modos del prisma y de la guía solo podrán tener lugar a lo largo de la distancia L , que estará asociada a la anchura del haz incidente tal y como se muestra en la Figura (25).

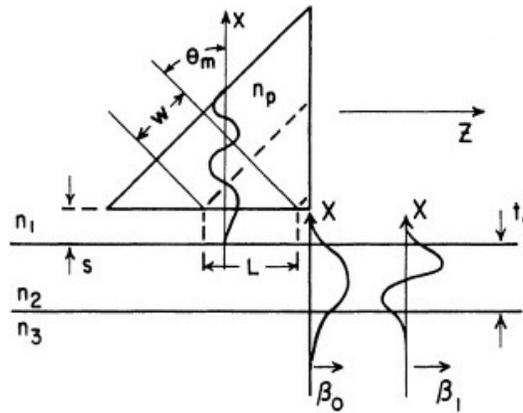


Figura 25: Esquema del acoplamiento por prisma [18]

Este tipo de acoplamiento suele ser útil para numerosas aplicaciones, puede funcionar tanto para introducir como para extraer la luz de las guías. En el caso de guías multimodo, el acoplamiento por prisma puede funcionar para determinar la potencia relativa de los diferentes modos y permite, también, determinar las pérdidas. Eficiencias del 80 % podrían ser alcanzadas (teóricamente).

- Acoplamiento por Rejilla (*Grating Coupling*):** Al igual que el método anterior, el acoplamiento por rejilla se lleva a cabo cuando no es posible realizarlo a través de la sección transversal de la guía y hay que hacerlo desde su superficie. También, de la misma forma que el acoplamiento por prisma, lo que se pretende es que el haz incidente (incidiendo con un ángulo θ_m sobre la superficie) y uno de los modos guiados de la guía, hagan concordar sus fases. Para que esto último sea posible, será necesaria la ayuda de una estructura, en este caso el *grating*, por el mismo motivo que en el anterior tipo de acoplamiento, sin emplear dicha estructura se tendría

la misma expresión que en (19), y por las condiciones para el acoplamiento, el seno tendría que ser mayor que 1, lo cual no es posible. El *grating* es una estructura periódica que hará variar, debajo de ella, los modos de la guía óptica, haciendo de esta forma que cada uno de ellos tenga una serie de armónicos espaciales, cuya constante de propagación en z viene dada por:

$$\beta_\nu = \beta_0 + \frac{\nu 2\pi}{\Lambda} \quad (21)$$

En ella, $\nu = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ y Λ es la periodicidad del *grating*. β_0 se corresponde, prácticamente, con la constante de propagación del modo determinado m , β_m (en la zona en la que ya no hay rejilla). Además, debido a que ν puede tomar valores negativos, la expresión con la que se verifica la concordancia de fase (22) es válida.

$$\beta_\nu = k n_1 \sin \theta_m \quad (22)$$

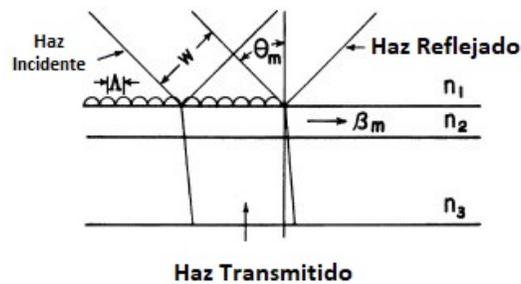


Figura 26: Esquema del acoplamiento por rejilla [18]

La energía del haz introducida en cada uno de los armónicos espaciales, será acoplada al armónico fundamental, que en general es bastante próximo al β_m ; y que de hecho, se convierte, una vez pasada la región del *grating*, en él. Por esta razón, este tipo de acoplamiento puede ser empleado tanto para introducir, como para extraer, la luz de la guía; pero, además, permitirá la selección del modo, mediante la variación del ángulo de incidencia, θ_m . En cuanto a la eficiencia óptima en esta técnica de acoplamiento, cabe destacar que no lo es tanto como en el caso del prisma. Mientras que en el acoplamiento por prisma, para los casos óptimos teóricos, se tenían eficiencias cercanas al 80 %; en el *grating*, generalmente, se tienen eficiencias entre el 10 y el 30 %. Esto se debe, fundamentalmente, a que en el caso anterior, dentro del prisma se producía la reflexión total interna; sin embargo, en el *grating* no ocurre esto y parte de la energía de la radiación incidente será perdida en el sustrato. Aún así, el acoplamiento por rejilla tiene diferentes ventajas,

una de ellas es que se fabrica de manera que forme parte de la guía, entonces, al acoplar, las eficiencias se mantendrán constantes y no se verán afectadas por condiciones externas como posicionamientos diferentes o vibraciones. Por último, destacar que este método de acoplamiento será el utilizado en la parte experimental.

- **Acoplamiento Cónico** (*Tapered Coupling*): Este tipo de acoplamiento consiste en emplear una guía que de forma gradual va disminuyendo su espesor, de manera que se produzca una forma cónica en la región de acoplamiento. En concreto, esta técnica de acoplamiento se basa en utilizar una guía, que se encuentra por debajo de la frecuencia de corte, que transfiere energía mediante los modos radiados.

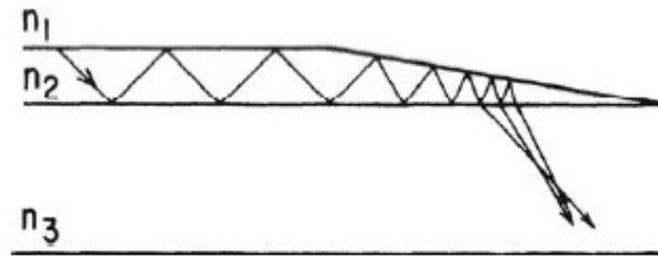


Figura 27: Esquema de un acoplador cónico [18]

La onda que es guiada por el interior del núcleo de la guía, al ir disminuyendo éste su espesor, va a disminuir el ángulo de incidencia sobre las intercaras a un ritmo constante, hasta el punto de que la incidencia se produzca con un ángulo menor al ángulo crítico para que se produzca la reflexión total interna. A partir de ese punto, parte de la energía será refractada al sustrato y también, fuera de la guía; al estar en la región de acoplamiento, y procediendo de esta manera, se pueden obtener eficiencias rondando el 70 % al acoplar. Las pérdidas, en general, están asociadas a la dispersión de los modos radiados en el aire. El acoplamiento cónico, que tiene la ventaja de su fácil fabricación, suele emplearse más para extraer la luz que para introducirla, ya que en el caso de tener que introducirla las eficiencias son muy bajas (para que fuera útil se necesitaría tener la situación recíproca, pero es muy complicado de obtener).

Finalmente, matizar que, todas las técnicas mencionadas, son algunas de las formas en las que se puede acoplar la luz de forma muy general. Pero en la práctica esto estaría adaptado a cada uno de los casos particulares. Por ejemplo, un caso es el de tener que acoplar la luz desde una fibra a una guía, que suele ser uno de los componentes claves en los circuitos ópticos integrados. Además de acoplar directamente el haz de luz a la guía o una fibra a la guía, también podría darse el caso de

acoplamientos entre dos guías, y todos ellos adaptarían las técnicas de acoplamiento a las necesidades específicas requeridas.

2.3.2. Medidas de los Índices de Refracción

Los índices de refracción, sus variaciones y sus perfiles, son unas de las características más relevantes que se quieren conocer de las guías ópticas. Por tanto, dentro de la caracterización de las guías ópticas, las técnicas para conocerlos, cobrarán especial importancia. Conocer el perfil del índice de refracción permitirá, a su vez, conocer otras propiedades de la guía, como las pérdidas, las longitudes de onda de corte, el patrón seguido por los diferentes modos guiados, etc. Además, conocidas estas propiedades, también es posible realizar modificaciones en el índice de refracción para minimizar las pérdidas y optimizar el rendimiento de la guía en cuestión.

Para poder medir los índices de refracción y los perfiles, así como, realizar variaciones posteriores para la optimización del dispositivo, se han desarrollado una serie de técnicas que permiten llevarlo a cabo. Algunas de ellas son las descritas a continuación [19]:

- Reflectometría y Elipsometría:** Antes de abordar estas técnicas, es preciso comentar, brevemente, cómo es el índice de refracción. En general, el índice de refracción (n) es un número complejo formado por una parte real y otra imaginaria, es decir, $n = n' - n''$. Donde la parte real, n' , está asociada al cambio de velocidad que experimenta la luz al propagarse en ese medio; y la parte imaginaria, n'' , es el coeficiente de extinción (o absorción), que describe cómo es absorbida o dispersada la luz.

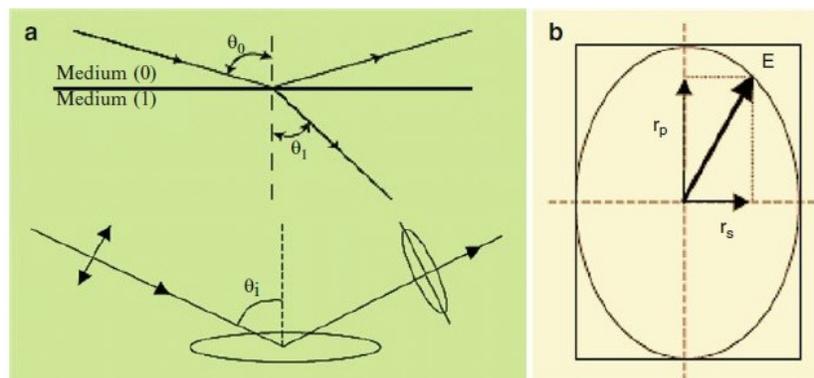


Figura 28: Reflexión y transmisión. Haces lineales pasando a polarización elíptica [19]

Las técnicas de reflectometría y elipsometría lo que van a permitir es conocer las dos partes del

índice de refracción. En concreto, con la *reflectometría* será posible obtener una aproximación de la parte real del índice de refracción, mientras que con la *elipsometría* se podrá obtener una aproximación de la parte real y del coeficiente de extinción.

Estas técnicas van a jugar con la polarización de la luz para poder determinar n . Según lo mostrado en la Figura (28), se puede apreciar que un haz linealmente polarizado puede verse como si su campo eléctrico tuviera dos componentes perpendiculares entre sí y que oscilan en fase, r_p y r_s . La luz que viaja linealmente polarizada, al reflejarse en la superficie de separación entre dos medios, hace que la amplitud de r_p y r_s cambie y por tanto se generará un desfase entre ambas, haciendo así que la luz pase a estar polarizada elípticamente. Lo que permitirá la *elipsometría* es analizar la fase y la amplitud de la luz reflejada, y así poder conocer las características de la superficie. En general, los elipsómetros se obtienen con un polarizador que va a ser rotado, generando de esta forma que el plano de polarización también rote (en torno al eje de la luz incidente). En el otro lado, es decir, en el lado donde se detecta, la luz (ya polarizada elípticamente) atravesará un analizador que se encuentra fijo. La intensidad captada por el detector variará en función de la rotación del primer polarizador, así como con las amplitudes y las fases originales. Este método va a regirse, principalmente, por las dos siguientes expresiones:

$$\rho_e = \tan \Psi e^{\Delta} \quad (23)$$

$$\Psi = \frac{|R_p|}{|R_s|} \quad (24)$$

En las expresiones anteriores, Δ se corresponde con el cambio de fase entre r_p y r_s al reflejarse, y Ψ sería el ángulo el cual tiene por tangente la relación entre las intensidades de las componentes, R_p y R_s . Salvo alguna excepción, generalmente, el índice de refracción complejo se podrá calcular de la siguiente manera:

$$\tilde{n} = \frac{\left[\sqrt{1 - 4 \sin^2(\theta_0) \tan(\Psi) e^{i\Delta} + 2 \tan(\Psi) e^{i\Delta} \tan^2(\Psi) e^{i\Delta}} \right] n_0 \sin(\theta_0)}{\cos(\theta_0) [1 + \tan(\Psi) e^{i\Delta}]} \quad (25)$$

Donde n_0 es el índice de refracción del medio y θ_0 el ángulo de incidencia.

En cuanto a la *reflectometría*, y por tanto el cálculo de la componente real del índice de refracción, se tiene que sobre la superficie incidirán haces con polarización p y s. Las intensidades de

estos haces reflejados, R_p y R_s , se pueden medir y, posteriormente, emplearse para calcular el índice de refracción usando las ecuaciones de Fresnel. El n_R va a venir dado por (26), donde

$$\rho = \sqrt{\frac{R_p}{R_s}}$$

$$n_R = \sin \theta_i \sqrt{1 + \left(\frac{1 - \rho}{1 + \rho}\right)^2 \cdot \tan^2 \theta_i} \quad (26)$$

- Acoplamiento por Prisma (Prism Coupling):** Empleando la técnica del *acoplamiento por prisma* va a ser posible medir algunas de las características fundamentales de la guía como el índice de refracción y su perfil, los modos guiados o su espesor. Para ello se necesitará utilizar un prisma que tenga un índice de refracción alto, al que se denominará n_p , y que será mayor que el índice de refracción del material a medir. Este prisma se debe sujetar sobre la guía de forma que entre ellos quede un pequeño espacio, de unas 0,1 micras. Esta pequeña porción de aire formada entre ambos materiales será imprescindible para que se produzca un correcto acoplamiento.

Para la medición se llevará a cabo un proceso que comienza con el acoplamiento del haz de un láser en la guía. Con esa finalidad, se hará incidir el haz sobre una de las caras del prisma, y siguiendo lo explicado en el apartado 2.3.1, habrá ciertos ángulos de incidencia para los cuales los campos evanescentes del prisma y de la guía se acoplen, excitando, así, el modo guiado correspondiente a ese ángulo de incidencia.

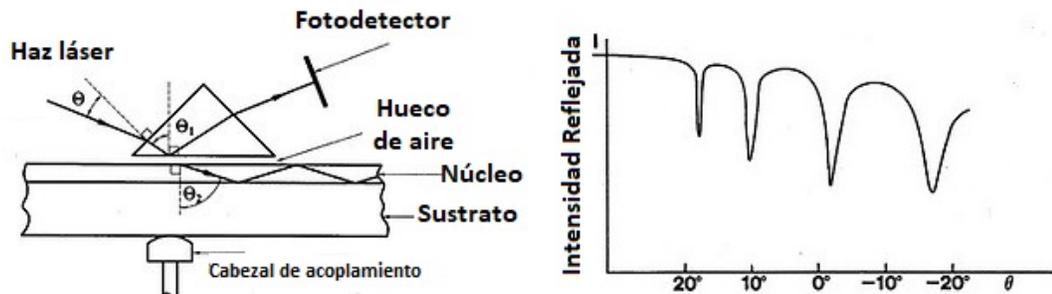


Figura 29: Patrón de intensidad en función del ángulo de incidencia (Prism Coupling) [20]

Una vez acoplada la luz, existen diferentes formas de proceder para obtener el valor del índice de refracción efectivo. Una de ellas se basaría en realizar lo siguiente:

La intensidad de un modo en particular se optimiza moviendo el haz láser en la dirección vertical, buscando el máximo/mínimo de intensidad. Ya conseguido lo anterior, se necesita buscar el ángulo “cero”; para ello se girará el prisma buscando que el haz se refleje de vuelta, a lo largo de la normal, esa posición angular se tomará como la referencia para medir los demás ángulos con respecto a ella. En el lado opuesto al prisma, es decir, del otro lado de la guía, se posicionará un detector, y variando/girando la posición del detector con respecto a la guía, se irá generando un espectro como el de la Figura (29), que incluye información sobre las intensidades medidas en función del ángulo de incidencia. En ese espectro de rotación se pueden observar una serie de mínimos de intensidad que se corresponden con cada uno de los modos guiados de la guía óptica empleada, esto tiene lugar porque el detector recibirá la luz reflejada en la base del prisma a lo largo de todos los ángulos de su giro, excepto en aquellos ángulos en los que el haz es reflejado de vuelta a lo largo de la normal, es decir, en los ángulos de incidencia correspondientes a los modos guiados, θ_m . De esta forma se puede conocer cuántos modos guiados tiene la guía, 1 por cada mínimo de intensidad, y también, se pueden saber los ángulos de incidencia para los cuales se acopla la luz a un modo en particular. Ya medidas estas posiciones angulares, será posible conocer el índice de refracción efectivo de la guía mediante la siguiente expresión:

$$n_{eff,m} = n_p \sin \left(\theta_p + \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta_m}{n_p} \right) \right) \quad (27)$$

Donde n_p es el índice de refracción del prisma, θ_p el ángulo del prisma y θ_m las diferentes posiciones angulares medidas para los mínimos de intensidad ($m = 0, 1, 2, \dots$). Una vez determinado el índice efectivo del modo m , también será posible conocer su constante de propagación, β_m , de la siguiente forma:

$$\beta_m = \beta_0 \cdot n_{eff,m} = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_{eff,m} \quad (28)$$

Siendo λ_0 la longitud de onda del haz incidente. Finalmente, destacar que una vez conocidos los índices de refracción efectivos para cada modo de la guía, se puede aproximar la forma de los perfiles del índice de refracción siguiendo algún método en especial para ello, como el *WKB*, que permite dar soluciones aproximadas a las ecuaciones asociadas al problema.

2.3.3. Parámetros de Rendimiento: Pérdidas en Guías Ópticas

Habiendo ya hablado de características de las guías ópticas como, por ejemplo, los diferentes modos de propagación soportados, los índices de refracción y sus perfiles asociados, otro de los factores y propiedades relevantes, a la hora de describir bien el comportamiento y las características de una guía óptica en particular, son las pérdidas o atenuación que sufre la luz cuando se propaga por el interior de la misma. Conocer las pérdidas del diseño original permitirá, a su vez, optimizar el sistema, para así conseguir la menor atenuación posible y mejorar su rendimiento.

Las pérdidas que tienen lugar en las guías se van a deber, normalmente, a tres razones [18]: la dispersión, la absorción o la radiación de la luz. En general, las pérdidas por dispersión son las que priman en guías de cristal o dieléctricas; las pérdidas por absorción son más frecuentes en aquellos dispositivos hechos con semiconductores u otros materiales cristalinos; mientras que las pérdidas por radiación cobrarán especial relevancia cuando se tienen sistemas con guías curvadas.

Una expresión como la (29), permite cuantificar cuánta potencia óptica sigue dentro de la guía después de propagarse una distancia x ,

$$I(z) = I_0 \cdot 10^{\left(-\frac{az}{10}\right)} \quad (29)$$

Donde I_0 es la potencia inicial introducida, y a es el coeficiente de atenuación de la guía, cuyas unidades son dB/cm. Si se quieren conocer las pérdidas, medidas en dB, se debe recurrir a la expresión (30):

$$L(\text{dB}) = -10 \log \left(\frac{I(z)}{I_0} \right) = 10 \log \left(\frac{I_0}{I(z)} \right) \quad (30)$$

Los diferentes tipos de pérdidas se encuentran descritos, brevemente, a continuación [18]:

- **Pérdidas por Dispersión** (*Scattering*): En cuanto a las pérdidas por dispersión existen dos tipos, las pérdidas por dispersión volumétrica y las pérdidas por dispersión superficial.

Las *pérdidas por dispersión volumétrica* se deben principalmente a imperfecciones en el material de la guía. Entre estas imperfecciones se pueden encontrar huecos, átomos contaminados,

defectos de la estructura cristalina, etc. Las pérdidas por unidad de longitud debido a la dispersión volumétrica van a ser proporcionales al número de imperfecciones que existan en esa unidad de longitud. Por otro lado, este tipo de pérdida también va a depender del tamaño de las imperfecciones. Cuando el tamaño de éstas es muy pequeño en comparación con la longitud de onda se pueden considerar despreciables frente a la dispersión superficial.

Las *pérdidas por dispersión superficial* son más significativas que las anteriores y se ven incrementadas según aumenta el orden del modo de propagación, debido a que la interacción con la superficie de la guía es más fuerte en estos casos. Considerando el diagrama de la Figura (30), el número de reflexiones en una longitud L viene dado por:

$$N_R = \frac{L}{2 \cdot t_g \cdot \cot \theta_m} \quad (31)$$

Donde t_g es el espesor del núcleo de la guía, L la longitud de la guía considerada y θ_m el ángulo de incidencia para el modo guiado m . La pérdida por dispersión superficial ocurre en cada una de las reflexiones que tienen lugar en las superficies, por ello, también, experimentan más pérdidas los modos más altos, porque interactúan con una superficie mayor (más reflexiones). En cuanto a la pérdida experimentada, se puede tener en cuenta una atenuación exponencial:

$$I(z) = I_0 \cdot e^{-az} \quad (32)$$

Donde I_0 es la intensidad inicial (para $z = 0$) y a el coeficiente de atenuación de la guía.

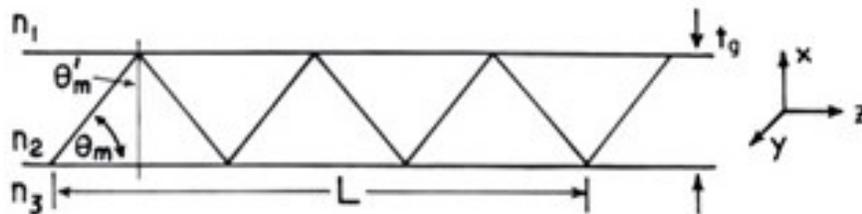


Figura 30: Diagrama rayos ópticos, para la determinación de la pérdida por dispersión [18]

- Pérdidas por Absorción:** En general, las pérdidas por absorción, que se dan principalmente en materiales cristalinos, suelen ser muy pequeñas en comparación con las producidas por *sacttering*, y por tanto, despreciables. Cuando resultan relevantes, es decir, en presencia de átomos

contaminantes, estas pérdidas suelen ser de dos tipos: las pérdidas por absorción entre bandas y las pérdidas por absorción de portadores libres.

En el caso de las *pérdidas por absorción entre bandas*, lo que se tiene es que para fotones con energía superior a la energía del *gap*, éstos tienden a ser absorbidos por el semiconductor, cediendo así su energía, y generando el salto de electrones desde la banda de valencia a la de conducción. Esto anterior, normalmente, se traduce en coeficientes de absorción superiores a 10^4 cm^{-1} . Para evitar estas pérdidas por absorción entre bandas se pueden hacer diferentes cosas. Una de ellas consiste en variar la longitud de onda, aumentándola, de forma que ésta sea mucho mayor que la longitud límite para la absorción que tenga el material de la guía. Otra manera sería añadir un nuevo elemento/compuesto al que conforma el semiconductor, con una concentración suficiente que permita variar longitud de onda límite para que la absorción tenga lugar. Finalmente, se podrían combinar ambas opciones para llegar al mismo propósito.

Las *pérdidas por absorción de portadores libres* están asociada a la absorción que ocurre en las bandas. Se diferencia de la anterior en que un fotón cede parte de su energía a un electrón que ya se encuentra en la banda de conducción, o a un hueco que está en la de valencia.

- **Pérdidas por Radiación:** Las pérdidas por radiación son las que tienen lugar cuando la energía del fotón se emite al medio que rodea la guía, y por tanto, ya no es guiada. Es un tipo de pérdida que tiene lugar tanto en guías planas como acanaladas, tanto rectas como curvas.

En el caso de las guías planas y las guías acanaladas rectas, generalmente, cuando se encuentran lejos de la frecuencia de corte, estas pérdidas son muy pequeñas, y por tanto, despreciables. En el caso de encontrarse en una situación próxima a la frecuencia de corte, la mayor parte de la energía será radiada al sustrato. Normalmente, esto es más frecuente para los modos guiados más altos, ya que son más próximos a la frecuencia/longitud de onda de corte, que los primeros modos guiados.

En el caso de las guías acanaladas curvas, estas pérdidas sí son más significativas. Esto se debe a que la forma del campo eléctrico se ve modificada al doblar la guía óptica, por lo que las pérdidas por radiación aumentarán. Normalmente, los radios de curvatura de las guías vienen determinados por este tipo de pérdidas antes que por motivos de imposibilidades de fabricación.

Una forma de analizar las pérdidas por radiación son las diferentes velocidades involucradas en el sistema. La velocidad de fase tangencial de una onda que se propaga por una guía de onda curva, debe ser proporcional a la distancia que hay entre la superficie de la guía y el centro de curvatura de ésta, sino el frente de fase no se conservaría. Una forma de visualizarlo es la Figura (31), donde se va a considerar que la luz se propaga por el interior de la guía óptica curva, cuyo radio es R , y asumiendo que tienen lugar para un modo guiado en particular y con la constante de propagación de la guía β_z . Se pretende analizar para que radio, $R + X_r$, la velocidad de fase excede el límite que permite tener luz guiada y mantener constante el frente de fase.

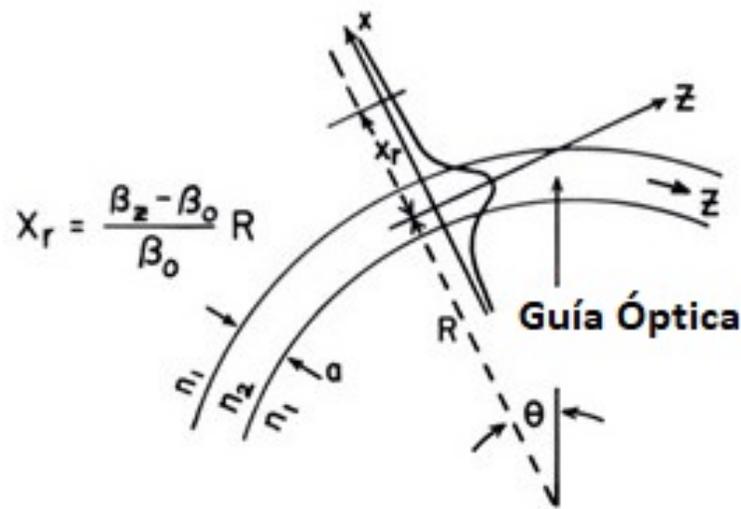


Figura 31: Diagrama del radio de curvatura asociado a pérdidas por radiación [18]

Para la propagación es necesario que se cumpla que la variación en el ángulo con respecto al tiempo, $\frac{d\theta}{dt}$, debe ser la misma para todas las ondas en el frente de fase, resultando esto en las siguientes expresiones:

$$(R + X_r) \frac{d\theta}{dt} = \frac{\omega}{\beta_0} \quad (33)$$

$$R \frac{d\theta}{dt} = \frac{\omega}{\beta_z} \quad (34)$$

Donde β_0 se corresponde con la constante de propagación del medio que rodea al núcleo

de la guía por la parte superior, generalmente aire; y β_z sería la constante de propagación en la guía para el radio R . Relacionando las expresiones (33) y (34) se tiene que:

$$X_r = \frac{\beta_z - \beta_0}{\beta_0} \cdot R \quad (35)$$

Una vez conocida la expresión para X_r , solo faltaría comentar que la luz, para un modo con un radio más grande que $R + X_r$, no tiene la suficiente velocidad para mantenerse guiado y, por tanto, se separará del modo y se radiará al medio (aire, en general).

Para poder medir las diferentes pérdidas que tienen lugar en las distintas guías ópticas, lo que se hace, normalmente, es introducir, por uno de los extremos de la guía, luz con una potencia conocida, y medir la potencia de salida en el otro extremo. El problema de esta forma de proceder es que resulta muy imprecisa. En general, no permite conocer las pérdidas en el proceso de acoplamiento, tanto al introducir como al extraer la luz; en el caso de guías multimodo, no es posible conocer las pérdidas de forma individual, es decir, las asociadas a cada modo, etc. Para subsanar este tipo de problemas existen distintas técnicas, elegidas en función de las características de la guía, las pérdidas que sean más relevantes en ese caso, ... Por ejemplo, para conocer las pérdidas en el acoplamiento, se realizan medidas para distintas longitudes de la guía y de la representación gráfica obtenida se pueden determinar ese tipo de pérdidas (extrapolando a longitud 0). Otro ejemplo sería para el caso de querer conocer la pérdida de diferentes modos; esto se puede realizar con un acoplamiento por prisma, ya que permite diferenciarlos, entre otras muchas técnicas.

3. Circuitos Ópticos Integrados

Un *Circuito Óptico Integrado* [7] u *OIC*, por sus siglas en inglés, consiste en un circuito óptico, el cual tiene todos sus componentes integrados en una fina capa, generalmente de un material semiconductor. En ese único sustrato están presentes componentes como acopladores, moduladores, divisores, fotodiodos, detectores, etc; además de emplear un diodo láser como fuente. Lo que va a permitir la integración es un sistema más estable y compacto.

Los circuitos ópticos integrados están divididos en diferentes tipos, en concreto tres. El primero de ellos es el *circuito óptico integrado monolítico*, éste se refiere a la situación en la que los tres elementos principales del OIC (la fuente, la guía y el detector) se encuentren todos integrados en un único sustrato de un material semiconductor. Otro tipo es el *circuito óptico integrado híbrido*, en este caso los tres componentes principales están hechos de materiales distintos; por ejemplo, unos componentes con materiales semiconductores y otros con dieléctricos. El último de los casos consistiría en una situación intermedia entre los dos anteriores y se denominarán *quasi-monolíticos* o *quasi-híbridos* OIC; matizar que las guías ópticas en ambos serán de materiales dieléctricos.

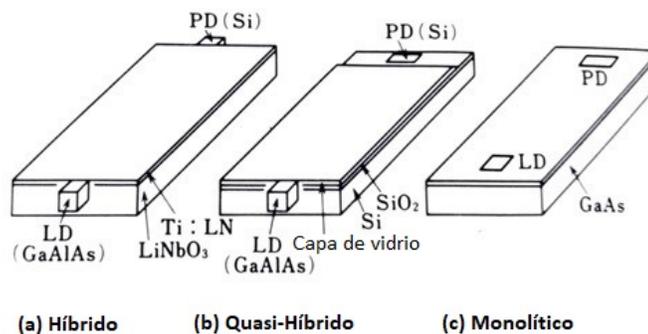


Figura 32: Tipos de circuitos ópticos integrados [7]

Desde la segunda mitad del último siglo, y más concretamente en sus últimas décadas, la integración de circuitos ópticos cobró especial relevancia, convirtiéndose en un campo con muchos frentes de investigación abiertos, y numerosas y progresivas mejoras, que a día de hoy siguen en continuo desarrollo. Los circuitos ópticos integrados supusieron ventajas significativas con respecto a los circuitos eléctricos convencionales a la hora de procesar y transmitir señales, mejorando tanto la funcionalidad como los costes.

Las ventajas de la integración en circuitos ópticos [7] son varias, una de las principales viene dada por

los componentes de los que consta. Son sistemas que se encuentran interconectados por fibras ópticas y emplean diodos láseres como emisores o fuentes. La utilización de numerosos diodos láseres, que emitan en diferentes longitudes cada uno, lo que va a permitir es que, al propagarse cada uno de forma independiente en la guía, se puedan transmitir diferentes y múltiples señales a la vez, es decir, estarán multiplexadas. Además, las señales podrán ser direccionadas y separadas, mediante la utilización de filtros, a la hora de la detección.

Todo esto está permitido, en parte, por el empleo de fibras ópticas, las cuales tienen una serie de ventajas frente a otro tipo de interconectores, como los cables metálicos o el aire (en señales de radio). Algunas de las ventajas que tienen las fibras ópticas son: las dimensiones, es decir, tienen tamaños pequeños y son ligeras; por otro lado, tienen un gran ancho de banda (capacidad de multiplexado); además, los materiales de fabricación son variados y poco costosos; tampoco les afectan las interferencias electromagnéticas, entre otras muchas ventajas, siendo la principal y más importante el hecho de tener pérdidas bajas en la transmisión (Figura (33)). No obstante, también existen desventajas como, por ejemplo, que no pueden emplearse para la transmisión de potencia eléctrica.

En cuanto a la comparación entre los circuitos integrados ópticos y eléctricos también existen ventajas a favor de los OIC's. Algunas de las ventajas de los circuitos integrados ópticos frente a los eléctricos son: una mayor fiabilidad; de nuevo, tienen unas dimensiones más pequeñas, son más ligeros y tienen un menor consumo; también tienen mayor ancho de banda; y, por otro lado, las pérdidas vuelven a ser menores y tampoco les afectan las vibraciones. Aún así, al igual que en el caso de las fibras, presentan alguna desventaja, como, por ejemplo, el alto coste de desarrollar nuevas tecnologías de fabricación.

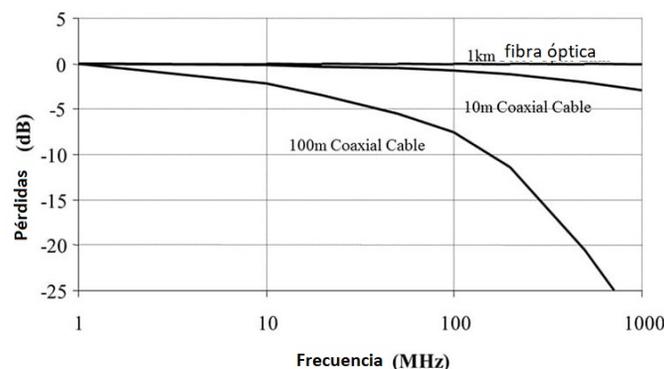


Figura 33: Comparación de las pérdidas de una fibra óptica y de un cable coaxial [21]

Una vez descritos los circuitos ópticos integrados y algunas de sus ventajas frente a las tecnologías previas, es interesante abordar su proceso de diseño, las técnicas de fabricación y ahondar en los principales componentes que los forman, dándole especial importancia a aquellas características o particularidades del chip estudiado experimentalmente.

3.1. Diseño de Circuitos Ópticos Integrados

En los últimos años este tipo de diseños se encuentra en constante evolución, siendo empleados los avances en numerosas aplicaciones como las comunicaciones. Los materiales a partir de los cuales se ha desarrollado van desde semiconductores del grupo IV (como el silicio o el germanio), al nitruro de silicio, pasando por otros como, por ejemplo, semiconductores compuestos (fosfuro de indio o arseniuro de galio), polímeros u otros materiales más exóticos. Entre todos esos materiales para el desarrollo de los circuitos integrados, lo que más ha destacado son los semiconductores del grupo IV, así pues, la tecnología recibió el nombre de *fotónica de silicio*. El uso de este material se debe, fundamentalmente, al hecho del empleo como base de trabajo, la ya existente, infraestructura de los semiconductores de óxido metálico complementario (CMOS); además, de la gran disparidad entre este material y los usados para la guía y el revestimiento, permitiendo esto, a su vez, unas guías ópticas de dimensiones inferiores a las micras y la gran densidad de integración que eso conlleva [22].

En cuanto al diseño en sí, existen varias maneras de proceder, aunque a grandes rasgos se siguen los siguientes pasos [22] [23]:

En primer lugar se diseñan los componentes fotónicos, activos y pasivos, de silicio, de manera que su rendimiento de trabajo sea óptimo. Posteriormente, se modelizan los circuitos y se hacen simulaciones con el diseño esquemático generado, intentando predecir su comportamiento en función de estímulos como, por ejemplo, señales eléctricas externas. Una vez diseñado lo anterior, se emplean diferentes softwares como asistentes de diseño, que permiten tener los distintos componentes sobre una máscara. Finalmente, se requieren una serie de verificaciones, entre las que se encuentra la verificación de la correspondencia entre el diseño y el esquema previo. De este proceso saldrán características del sistema que será necesario tener en cuenta a la hora de su estudio, ya que el circuito integrado estará optimizado para unas longitudes de onda concretas, posicionamientos, temperaturas, ... En el caso de no encontrar condiciones óptimas en el proceso experimental sería necesario rediseñarlo.

En resumen, el proceso de diseño consta de una serie de pasos sistemáticos que permiten obtener buenos resultados una vez fabricados los circuitos ópticos/fotónicos integrados. Una visión general de la metodología empleada puede observarse en el esquema mostrado en la Figura (34), además de una

descripción más detallada de cada parte del proceso en los siguientes apartados.

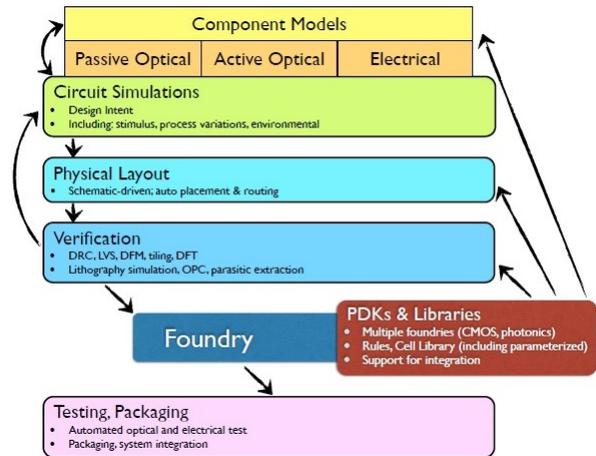


Figura 34: Esquema del proceso de diseño de un OIC [22]

3.1.1. Diseño de Componentes y Optimización

Aunque en el caso de este tipo de circuitos esté todo integrado en un mismo sustrato, en la actualidad, los diseños se centran en los de cada uno de los componentes de forma individual [2] [23]. Esto es así, fundamentalmente, porque su funcionamiento depende de la geometría y de los demás parámetros del material. Debido a esto último, un buen dispositivo estará basado en las simulaciones de la propagación de la luz en él, en función de dichos parámetros, buscando el punto óptimo de los componentes. Para ello se emplean técnicas de modelización electromagnética como, por ejemplo, el *Método de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo* o *FDTD* por sus siglas en inglés, que se basa en la utilización de diferencias finitas para la resolución de problemas electromagnéticos transitorios [24]. Otro método empleado sería la *Expansión de Modos Propios* o *EME* (Eigen-Mode Expansion), que es un método que permite obtener soluciones muy próximas a las reales de la propagación electromagnética, descomponiendo sus campos en una base de modos propios, pudiendo expresar cualquier solución de las ecuaciones de Maxwell, en la región de la guía óptica, como la superposición de sus modos de propagación [25]. También se puede emplear el *Método de Propagación del Haz* o *BPM* (Beam-propagation Method), que permite simular la evolución de la propagación de los campos dentro de una guía óptica, generalmente, para casos en los que las guías no sean rectas [26].

Tal y como se ha mencionado anteriormente, los componentes diseñados para el circuito y la propagación de la luz en ellos, tendrán un alto grado de dependencia con su propia geometría, siendo muy

sensibles a pequeñas variaciones, tanto en la geometría como en las condiciones de su entorno. En concreto, se verán afectados por los materiales del sistema, teniendo especial importancia la diferencia entre los índices de refracción del núcleo de la guía y los índices de refracción de la cubierta y el sustrato. Por ello, cobrará una especial relevancia en el diseño la elección de los mismos, a la hora de simular y optimizar el sistema, para obtener un mejor rendimiento.

En cuanto a la optimización de los dispositivos, al tener componentes con tantos grados de libertad, ésta puede resultar complicada, requiriendo, por tanto, algoritmos especializados que incluyan simulaciones en múltiples ámbitos. Incluyendo no solo respuestas ópticas del sistema, sino que también estén presentes las respuestas térmicas o mecánicas.

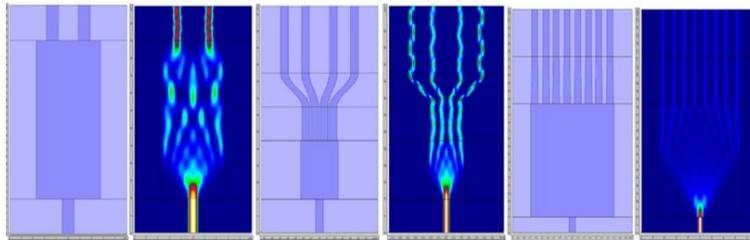


Figura 35: Ejemplo de una simulación de la intensidad del campo EM en dos componentes [2]

3.1.2. Diseño de Circuitos y Simulación

A diferencia del diseño de los componentes, en este caso no es necesario centrarse en la geometría del circuito, ya que no es tan relevante, ni afecta tanto al funcionamiento y propiedades del mismo. En su lugar, habrá que centrarse en la distribución espacial de los diferentes componentes sobre el sustrato y en cómo conectarlos entre sí para obtener una buena funcionalidad. En general, no suelen tener gran complejidad, incluso los más complejos están formados por la utilización de circuitos simples. Actualmente es algo que se encuentra en desarrollo, y la complejidad del diseño del sistema dependerá de la disponibilidad de un proceso y un software que permita diseñarlo de una forma fiable y asequible.

Para predecir el funcionamiento del circuito es necesario realizar simulaciones, pero a diferencia de las simulaciones realizadas para componentes, no es posible utilizar métodos computacionales que predigan la respuesta del sistema completo. En cambio, se abstraerán los componentes individuales del circuito y se centrará la simulación en mapear la respuesta del circuito en la entrada y en la salida del mismo [23]. Este tipo de simulaciones pueden dividirse en *simulaciones en el dominio de frecuen-*

cia y simulaciones en el dominio de tiempo.

Las simulaciones en el dominio de frecuencia se basan en obtener la respuesta del sistema, en la entrada y en la salida, en función de la longitud de onda, atendiendo a la amplitud y a la fase. Como los componentes fotónicos son dependientes de la longitud de onda, será necesario obtener modelos de comportamiento que sean precisos para todo el rango de frecuencias en el que se simule. Este tipo de simulaciones son más útiles en el caso de dispositivos que sean pasivos y lineales. En cuanto a las simulaciones en el dominio de tiempo, van a resolver la respuesta del circuito, de nuevo en su entrada y salida, para un estímulo variable en el tiempo. El resultado final se obtendrá mediante la resolución del problema según avanza la señal en el tiempo, encontrando cuál es la respuesta del sistema en cada uno de sus nodos y actualizando la respuesta del circuito en cada paso.

3.1.3. Paquetes de Diseño de Procesos (PDK)

Los *Paquetes de Diseño de Procesos* o *PDK (Process Design Kits)* [23] son una parte esencial para el diseño de los circuitos integrados. Para hacerlo de forma eficiente se requerirá el uso de bibliotecas que contengan los diferentes componentes, ya diseñados, necesarios para el desarrollo del circuito. Los PDK ponen a disposición del diseñador del circuito un conjunto de componentes optimizados para una plataforma particular. Además de una serie de especificaciones, detalles prácticos y requisitos para el diseño; bloques de construcción básicos, incluyendo partes de circuitos fundamentales o comunes; verificaciones, etc. Poniendo también a disposición herramientas de software para su desarrollo.

3.1.4. Generación del Diseño o la Distribución Física

Los distintos diseños se envían a plantas de fabricación, también conocidas como *foundries* o *fabs*. El diseño de los circuitos no consiste en geometrías particulares, sino que consiste en la distribución de diferentes celdas que se conectarán mediante guías ópticas. Este tipo de conexiones son más complejas que las que se realizan mediante cables convencionales. Esto se debe a que las guías ópticas tienen que tener unos radios de curvatura determinados, siempre dentro de unos límites; además de una separación determinada para que las pérdidas no sean demasiado grandes. En general, el enrutamiento con este tipo de conexiones se realiza manualmente, aún así, también existen programas con distintos algoritmos que permiten generar guías con diferentes caminos y curvaturas, pero el enrutamiento no es, nunca, completamente automático.

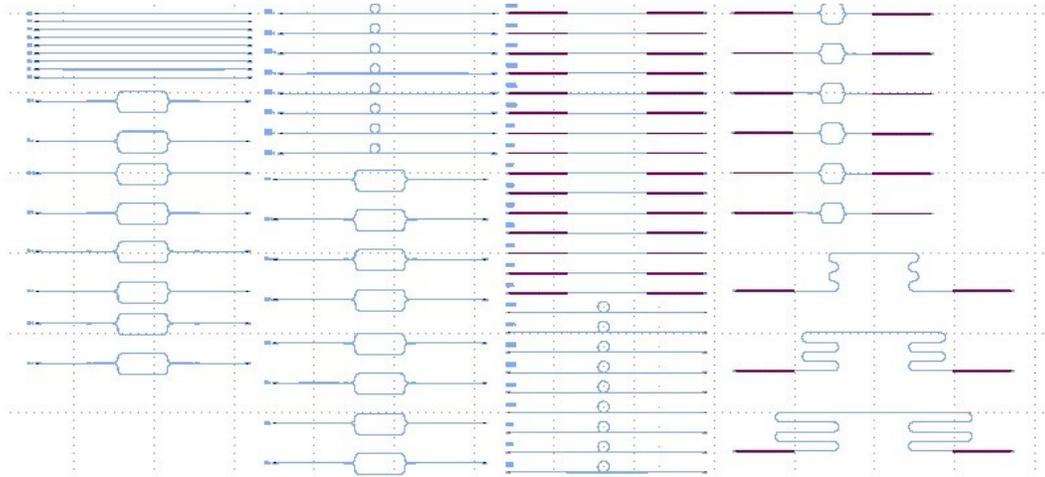


Figura 36: Ejemplo de layout

3.1.5. Verificaciones

En el proceso de *verificación* [23] lo que se busca es que, una vez generado el *layout*, se analicen posibles errores o se busque la posible falta de cumplimiento de algunas de las directrices de diseño que proporcionadas por la *fab*. Normalmente, estas directrices atienden a factores como las dimensiones críticas, ángulos, densidades, ... Para realizar estas verificaciones se utilizan softwares de verificación de las reglas de diseño (DRC) como por ejemplo, *Synopsis IC Validator*.

3.2. Técnicas de Fabricación de Circuitos Ópticos Integrados

Ya realizado el proceso completo de diseño del circuito óptico integrado, el siguiente paso es su fabricación. Para ello, es relevante escoger, previa y adecuadamente, los materiales que se van a emplear para el núcleo de la guía y el sustrato. En la fabricación de este tipo de circuitos se pueden encontrar tres pasos bien diferenciados [7], que se pueden visualizar en la Figura (37). El primer paso, se centra en los datos de la máscara/patrón (*mask or pattern data*). Posteriormente, en la creación de patrones en resina (*resist patterning*). Y, finalmente, llegaría la fabricación.

En cuanto a los pasos mencionados previamente, suelen ser comunes a todas las técnicas de fabricación. Por otro lado, las técnicas de fabricación de las que se dispone, también están especificadas en la Figura (37). En el primer método la resina se encuentra recubierta por una máscara; en el segundo, el proceso es el mismo pero sin recubrir la resina con la máscara, es decir, la resina está directamente expuesta al haz láser; el tercer método es un método directo, en el que se escriben directamente los

patrones sobre el sustrato.

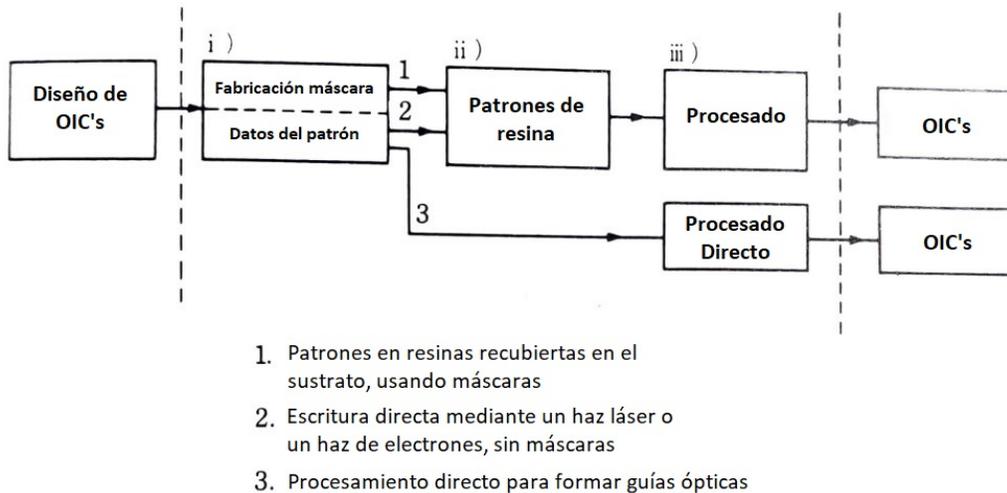


Figura 37: Esquema del proceso de fabricación de un OIC [7]

El buen resultado de todo el proceso dependerá de los materiales elegidos, que a su vez van a depender del tipo de luz al que vayan a ser expuestos. Aunque también estarán determinados por las aplicaciones o las capacidades/disponibilidades a la hora de la fabricación. Para cada uno de los casos que se puedan generar, existen diferentes técnicas, para las diferentes fases del proceso, que podrán ser elegidas en función de los resultados que se deseen.

3.2.1. Técnicas de Creación de Patrones

Dentro de las técnicas para crear patrones existen dos tipos, dependiendo de la fuente de exposición empleada. En el caso de emplear como fuente un haz láser la técnica se denominará *fotolitografía*. La otra técnica se denomina *litografía de haz de electrones*, que tal y como su nombre indica, utiliza como fuente de exposición un haz de electrones. Existen más técnicas, tantas como fuentes de exposición puedan utilizarse, pero estas dos son las principales.

El proceso de **fotolitografía** (Figura (39)), puede dividirse en las siguientes fases [7]:

- **Recubrimiento de Resina** (*Resist Coating*): Existen dos tipos de fotorresinas, las positivas y las negativas. En el caso de las negativas, lo que ocurre es que una vez revelada, la zona que ha sido expuesta al haz permanecerá. Por el contrario, si la fotorresina es positiva, el área que hubiese sido expuesta al haz desaparecerá.

En este proceso van a ser necesarias una serie de características de la resina empleada. Entre estas características destacan la sensibilidad, la resolución, su capacidad de adhesión y la uniformidad a la hora de cubrir el sustrato, ... La resina cubrirá el sustrato mediante centrifugado, consiguiendo el grosor deseado variando parámetros como la viscosidad de la fotorresina o la velocidad de giro, tal y como se muestra en la Figura (38).

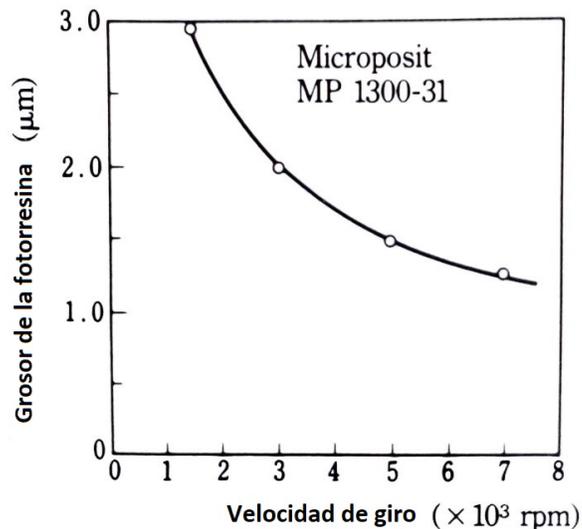


Figura 38: Grosor de la capa en función de la velocidad de rotación [7]

- **Exposición (*Exposure*):** Para la exposición de luz ultravioleta, se emplea una lámpara de mercurio, cuyo pico en el espectro se encuentra en torno a 365 nm. Además, una lámpara de descarga de deuterio, con un filtro de 200 a 300 nm, se utiliza para una exposición de luz ultravioleta más profunda. Existen diferentes formas de realizar el grabado, pero la más empleada es el *método de impresión por contacto*, que permitirá, en función de lo bueno que sea el contacto, una mayor resolución. Para poder tener una exposición uniforme sobre toda la superficie, será necesario un sistema bien alineado con la máscara. Otra posibilidad sería no utilizar máscaras y realizar una escritura directa sobre la resina utilizando haces láser, siendo la forma más común de proceder, la escritura de patrones de interferencia usando dos haces.
- **Revelado:** Después de la exposición, la fotorresina será revelada, sumergiéndola o rociándola con un líquido revelador, dejando o eliminando las áreas que fueron expuestas en función del tipo de resina utilizado. Una vez realizado este proceso de revelado, el material será sometido, durante un tiempo, a unas temperaturas de entre 100 y 200 °C para aumentar su resistencia.

- **Despegado y grabado** (*Lift-Off and Etching*): El procesado se lleva a cabo utilizando una resina grabada como máscara. Se empleará alguno de los métodos descritos en 2.2.1, como por ejemplo, intercambio iónico o difusión térmica, para la deposición. Será relevante y necesario que la resina tenga la resistencia suficiente para soportar estos procesos sin ser dañada. Una vez utilizado uno de esos procesos, la resina restante será eliminada con un disolvente destinado a este tipo de propósito, finalizando de esta manera el proceso.
- **Procesamiento Directo**: Otra posibilidad, en vez de realizar todo el proceso anterior, sería hacerlo de forma directa. Es decir, se puede conseguir un aumento del índice de refracción sin emplear la resina, simplemente con la utilización de un haz de electrones incidiendo y escribiendo directamente sobre el sustrato. Aún así, esta no suele ser la forma habitual de realizarlo.

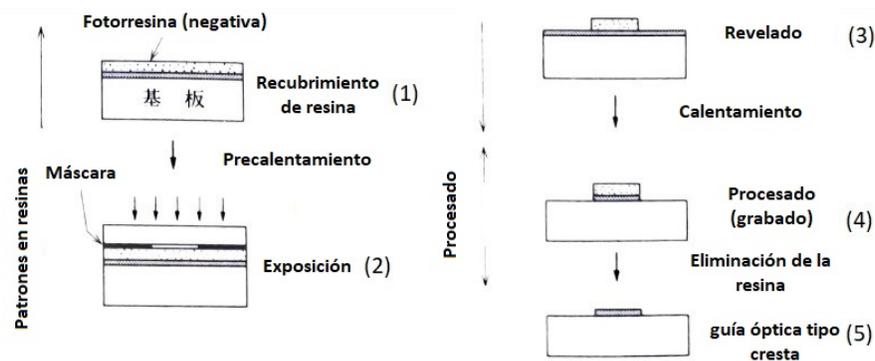


Figura 39: Esquema del proceso de fotolitografía [7]

En cuanto al proceso de **Litografía por haz de electrones** se tienen las siguientes fases [7]:

- **Resinas**: De forma análoga a la anterior técnica, van a existir dos tipos de resinas, las negativas y las positivas. Las características necesarias para este tipo de resinas son una buena resolución o la sensibilidad.
- **Sistema de Escritura con Haz de Electrones** (*Electron-Beam Writing System*): En este tipo de escritura no se emplean máscaras, sino que el grabado se produce incidiendo directamente con el haz de electrones sobre la resina. Esto se consigue con diferentes desviaciones del haz e incidiendo sobre distintas zonas de la estructura. En general, se obtiene una precisión muy alta, ya que estos sistemas de escritura suelen estar controlados mediante ordenadores que permiten una muy buena alineación del sistema.

- **Revelado:** Después de la exposición, al igual que en la otra técnica, se procede al revelado. En este caso habrá dos formas distintas de realizar esta fase. Una de ellas es la técnica de revelado en mojado, sumergiendo o rociando la muestra con el revelador; y, por otro lado, la técnica de revelado en seco utilizando plasma.
- **Procesamiento:** Será el mismo que el llevado a cabo en el caso de la fotolitografía.

3.2.2. Técnicas de Procesamiento

En el apartado anterior se mencionan técnicas de grabado o de creación de patrones que, a su vez, son procesos que están divididos en distintas fases. Una de estas fases es el procesamiento, dentro del cual se encuentran dos técnicas diferentes. Esta es una fase importante, ya que la fabricación de las guías y de los circuitos pasa por un procesado de los materiales utilizados para ese fin. Dentro de las técnicas de procesamiento destacan dos [7], una de ellas es la técnica de **despegado** (*Lift-Off Technique*), y otra es la técnica de **grabado** (*Etching Technique*).

En cuanto a la técnica de **Lift-Off**, Figura (40), se puede comentar que:

Es una técnica muy utilizada para fabricar finas capas, y para la creación de patrones sobre estas finas capas actuando como guías o cubiertas. El patrón es creado en una capa de resina depositada en un sustrato. Las características del patrón formados dependerán del tipo de resina utilizado, de su espesor, exposición, ... La película sobre la que se pretende crear el patrón se deposita primero sobre el material (zonas de sustrato y zonas en las que hay resina superpuesta) empleando técnicas como el sputtering, sumergiéndola, posteriormente, en un disolvente. Una vez se ha disuelto en ese disolvente, éste habrá penetrado en las líneas/huecos de la película. Esta película, que se encuentra sobre la resina, será, en parte, despegada junto con la resina. De esta forma, se habrá dejado un patrón sobre el sustrato, a partir de despegar una parte de las capas que estaban superpuestas en él. Esta técnica suele ser importante y bastante utilizada en la fabricación de un OIC. En general, no suele requerir de aparatos complejos y un patrón submicrométrico es posible si se eligen bien los espesores de las capas.

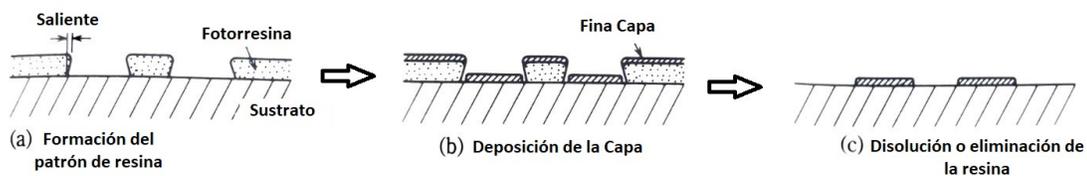


Figura 40: Esquema del proceso de lift-off [7]

La otra técnica de procesamiento es el **grabado** (*Etching*), que se encuentra ilustrada en la Figura (41): Con esta técnica se va a crear un patrón sobre una máscara, que después, será transferido mediante el grabado al material que se encuentre bajo la máscara. En muchos casos, puede ser utilizado como máscara de grabado un patrón sobre una resina. Si la resina no pudiera resistir el proceso de grabado, entonces, se emplearía como máscara un material más resistente. Las técnicas de grabado se pueden dividir a su vez en *grabado húmedo o químico* y *grabado seco*:

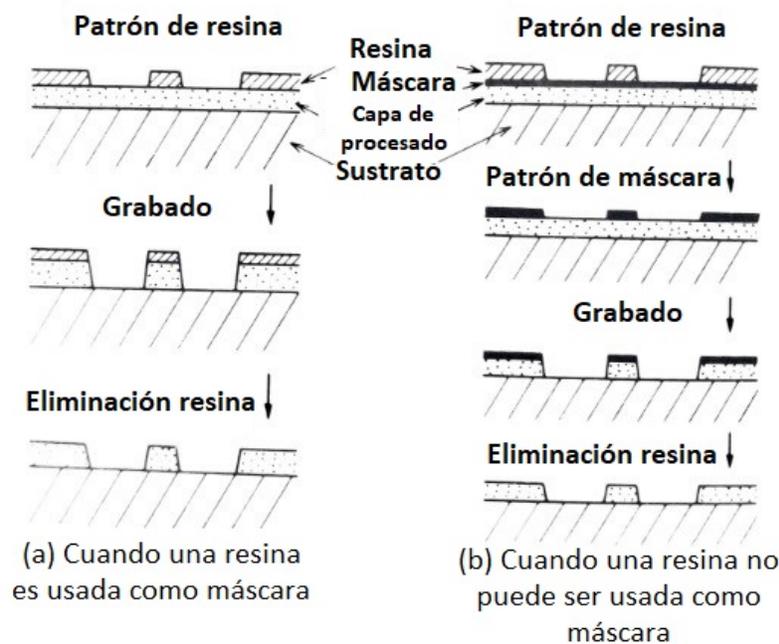


Figura 41: Esquema de la técnica de grabado (etching) [7]

- Grabado Húmedo o Químico (*Wet or Chemical Etching*):** Existen diferentes soluciones ácidas, salinas y alcalinas que pueden ser utilizadas como agentes grabadores. La selección de una de ellas se debe realizar considerando las selectividades de las reacciones que tienen lugar con los materiales de los que se dispone, tanto los de la resina como los del sustrato. El dispositivo se sumerge en el agente grabador y se mantiene en él, con unas condiciones de temperatura adecuadas para eliminar las posibles burbujas de aire. En este tipo de grabado no se requiere de ninguna instrumentación extra, aunque no se suelen esperar buenos resultados con este proceso por la falta de reproducibilidad.
- Grabado en Seco (*Dry Etching*):** Para este tipo de grabado se pueden emplear descargas de radiofrecuencia usadas para excitar plasma; también pueden ser utilizados iones energéticos. La

tasa o velocidad de grabado es posible variarla ajustando una serie de parámetros como, por ejemplo, la potencia de la radiofrecuencia, el voltaje, la corriente,... Existen diferentes maneras de hacer un grabado en seco, todas ellas emplean algún dispositivo característico destinado a esa función. Algún ejemplo puede ser el grabado con plasma (o *plasma etching*, por su nombre en inglés), que usa un aparato en concreto para producir plasma por una descarga de radiofrecuencia en el CF_4 , sometido a una presión determinada. Otra manera sería mediante plasma de O_2 , que se descompone en materiales orgánicos y sirve para eliminar la capa de la resina posteriormente. Estos dos últimos ejemplos son solo unos de los muchos métodos existentes para llevar a cabo el grabado en seco.

3.2.3. Fabricación de las Guías (3D)

En el apartado 2.2.1 se encuentran especificadas una serie de técnicas de fabricación para guías planas. En este caso, las guías que forman parte de los circuitos integrados son guías acanaladas o 3D. En concreto, este tipo de guías estaba descrito en 2.1.2, diferenciando entre guías enterradas en el sustrato (*buried type*) o guías tipo cresta (*ridge type*), aunque existen más tipos.

Los materiales más relevantes para este tipo de guías son el vidrio y el $LiNbO_3$. En cuanto a las técnicas de fabricación, en general, consisten en un patrón de la guía de onda sobre una fotorresina, junto con un procesamiento para guías 3D como puede ser el *lift-off* o el *dry etching*. La creación de los patrones en estos casos suele realizarse con la técnica de fotolitografía [7].

En cuanto a las técnicas de fabricación, en el caso de guías ópticas enterradas en el sustrato (*buried type*), el patrón de la guía de onda suele hacerse empleando fotorresinas, dispuestas sobre el sustrato con la técnica *spin-coated*, y empleando como método la técnica de la fotolitografía. En el caso de las guías tipo cresta (*ridge type*), las guías ópticas se forman sobre el sustrato, utilizando técnicas de microfabricación en las que se empleen máscaras con la forma o el patrón deseado. Atendiendo a este tipo de clasificación, el material por el que está formado la guía óptica y la técnica más relevante empleada en cada caso, se puede realizar un resumen como el de la Figura (42).

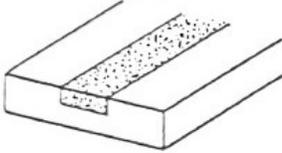
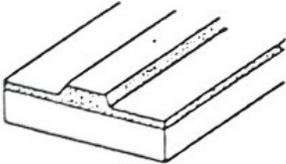
Estructura de la guía	Material Núcleo	Material Sustrato	Fabricación
 Enterrada en el sustrato	Ti:LiNbO ₃	LiNbO ₃	Difusión selectiva de Ti
	H ⁺ :LiNbO ₃	LiNbO ₃	Intercambio selectivo de protones
	K ⁺ , Ag ⁺ , Tl ⁺ : Vidrio SiO ₂ -B ₂ O ₃ -GeO ₃	Vidrio soda-lime Cuarzo Fundido	Intercambio Selectivo de Iones Grabado por Pulverización +CVD
	As ₄₀ Se ₁₀ S ₄₀ Ge ₁₀	Vidrio	Escritura directa (haz láser o de e ⁻)
 Tipo Cresta	Ti:LiNbO ₃	LiNbO ₃	Difusión de Ti + Grabado en Seco
	Nb ₂ O ₅	LiNbO ₃	Pulverización Catódica + despegado
	Corning #7059, Ta ₂ O ₅ -SiO ₂ , Al ₂ O ₃	Vidrio Pyrex Cuarzo Fundido	Pulverización Catódica + despegado Grabado en seco
	Fotopolímero	Cuarzo Fundido	Revelado, endurecimiento

Figura 42: Resumen de las técnicas de fabricación de las diferentes guías 3D [7]

3.2.4. Fabricación de Gratings

Una de las partes más relevantes a la hora de fabricar circuitos ópticos integrados es poder acoplar la luz dentro de ellos de forma eficiente. Una de las técnicas de acoplo más generalizadas en este tipo de sistemas es el acoplamiento por rejilla o *grating*. Es por ello que la fabricación de los mismos será un proceso que cobrará especial importancia.

Una estructura de rejilla o *grating* se puede fabricar de dos formas diferentes [18], o bien empleando una máscara y grabando la superficie de la guía óptica, o bien superponiendo la máscara sobre la superficie y depositando una fina capa sobre ella con el patrón del *grating*. En cualquiera de los dos casos, la parte más complicada es definir bien el espaciado de la rejilla, ya que éste deberá ser del orden de la longitud de onda. Como se suele trabajar en el visible o en el infrarrojo cercano, el espaciado del *grating* debe encontrarse entre los 1000 y 3000 Å. En general, las fotorresinas empleadas en la fabricación de este tipo de estructuras tienen la resolución adecuada, pero las fotomáscaras no. Por tanto, los *gratings* estarán fabricados a partir de un proceso de exposición por interferencia óptica, también conocido como exposición holográfica de la fotorresistencia (*holographic photoresist exposure*), esquematizado en la siguiente Figura.

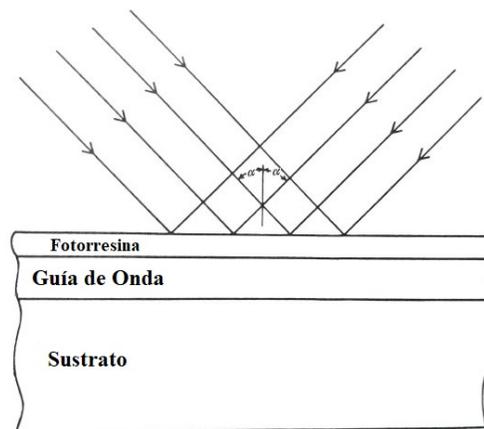


Figura 43: Esquema exposición holográfica [18]

Este tipo de exposición permite, que al incidir dos haces láser coherentes intersecando de forma oblicua, el patrón de interferencia resultante forme la estructura del grating. En este proceso, el sustrato, sobre el que se encuentra la guía óptica, va a necesitar ser cubierto, previamente, por una fotorresina aplicando alguno de los métodos descritos en 2.2.1. Para conocer la periodicidad del grating (Λ), bastará con establecer las relaciones existentes con el ángulo de incidencia de los haces (α), esta relación viene dada por la expresión (36),

$$\Lambda = \frac{\lambda_0}{2 \cdot \sin \alpha} \quad (36)$$

De la expresión anterior se puede deducir que el valor del espaciado (Λ) está limitado a valores más grandes que $\frac{\lambda_0}{2}$.

En el caso de querer gratings con espaciados más pequeños que lo que se podría conseguir con simplemente el haz láser, se puede utilizar un prisma rectangular durante la exposición, Figura (44). En ese caso la expresión para el espaciado viene dada por (37),

$$\Lambda = \frac{\lambda_0}{2n \cdot \sin \alpha} \quad (37)$$

Donde n es el índice de refracción del prisma rectangular y α el ángulo definido en la Figura (44).

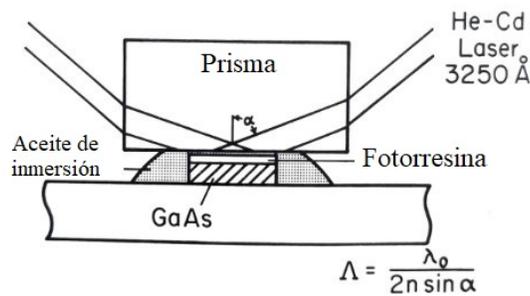


Figura 44: Esquema exposición holográfica mediante prisma rectangular [18]

Cuando ya ha tenido lugar la exposición, se procederá al revelado, empleando alguno de los métodos, ya conocidos, para poder generar la máscara necesaria sobre la superficie de la guía óptica. El grating se podrá producir empleando un grabado mediante procesos químicos, que dañan menos el material de la guía; o haces de iones, que dan lugar a gratings con estructuras más uniformes. Otra manera de generar las estructuras de rejilla, que no sea el grabado, implica la deposición de finas capas en forma de barras sobre la superficie de la guía óptica. Una vez depositadas se requerirá del uso de una máscara para poder definir dichas formas.

3.3. Componentes Principales de los Circuitos Ópticos Integrados

Dentro de este tipo de circuitos, se pueden encontrar numerosos dispositivos integrados en él, para así garantizar el correcto funcionamiento del circuito, y para permitir al circuito ser útil en la aplicación para la cual haya sido desarrollado. Aunque existen numerosos tipos de dispositivos que pueden ser integrados dentro del circuito y que pueden tener distintas funcionalidades, en este apartado se expondrán algunos de los componentes básicos y principales que pueden conformar un circuito óptico integrado.

Estos componentes básicos [7] [27] a su vez pueden agruparse en función del trabajo que realicen, pudiendo encontrarse componentes que desvían el camino óptico (*optical path-bending components*), componentes divisores del haz óptico (*optical-beam dividers*), polarizadores, multiplexores y demultiplexores de longitud de onda, lentes, etc.

3.3.1. Desviadores del Camino Óptico (Optical Path-Bending Components)

Para poder integrar muchos componentes en un único sustrato es imprescindible el uso de componentes que desvíen los caminos ópticos, de esta forma se podrá cambiar la dirección del camino según sea

necesario. Algunos de estos componentes se encuentran descritos a continuación:

- Guías de Onda Curvas (*Bent Waveguides*):** Para conectar las fibras ópticas al extremo de la salida de un acoplador direccional, la separación entre ambos tiene que ser mayor que el diámetro del recubrimiento (*cladding*) de la fibra. Como el diámetro del *cladding* es mayor que la separación direccional, previamente mencionada, será necesario emplear un desviador del camino óptico. Entonces, para poder unir dos guías de onda rectas, separadas entre sí una distancia l_x en la dirección x y una distancia l_y en la dirección y , tal y como se muestra en la Figura (45, caso (a)), será necesaria una guía de onda curva. Esto se consigue buscando valores para l_x y l_y , de forma que éstos sean lo más pequeños posibles y que las pérdidas al conectar ambas guías sean mínimas, generando, así, una guía óptica curvada en múltiples secciones (45, caso (b)). Si la longitud de cada una de las secciones, ΔL , se corresponde con la longitud de acoplamiento coherente, L_c , aumentará el número de secciones y, por tanto, el ángulo de sus esquinas disminuirá, resultando a su vez en una disminución de las pérdidas por dispersión.

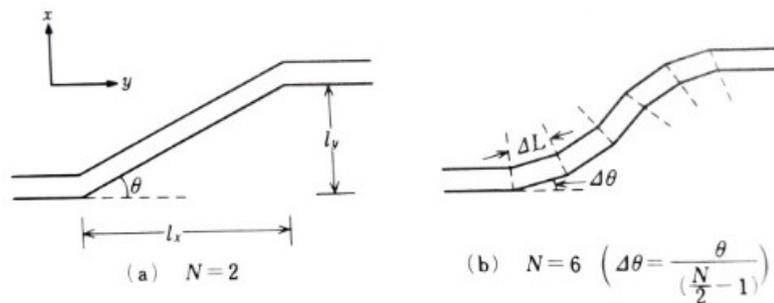


Figura 45: Única sección para la unión de guías (a). Múltiples secciones curvas (b) [7]

- Otros Tipos de Desviadores del Camino Óptico:** A parte de las guías de onda curvas, existen otros dispositivos que permiten variar la dirección de propagación de la luz. Algunos, aunque no todos, son:
 - Prisma:** Se dispone de un prisma, localizado en una guía de onda plana, cuyo principio de funcionamiento es el mismo que cuando se encuentra en la superficie. Al incidir los haces de luz sobre él, como tiene un n diferente, por la Ley de Snell, el camino del haz se verá desviado.
 - Terminación Cónica:** La terminación cónica o *Taper Termination*, se basa en intentar que la zona cónica de la guía tienda a tener un espesor de cero, y que la onda guiada tenga

un ángulo incidente mayor que el ángulo crítico (condición para la TIR), para que así sea posible curvar la onda y cambiar su dirección.

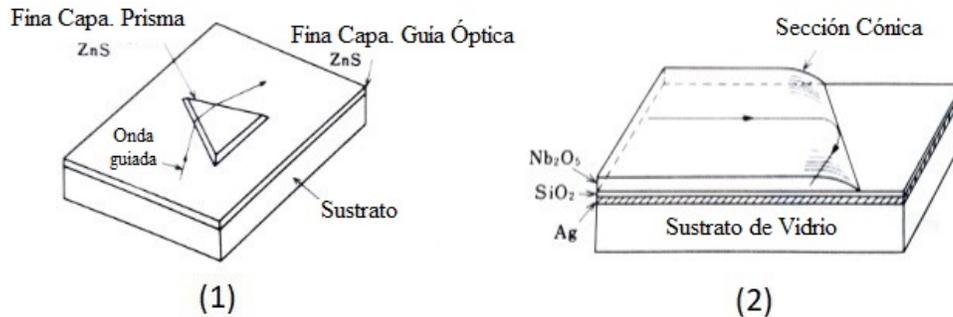


Figura 46: Desviación por prisma (1). Desviación por terminación cónica (2) [7]

3.3.2. Divisores de Potencia (Power Dividers)

Los divisores de potencia también son elementos claves en estos circuitos, ya que permitirán la división de la señal óptica en diferentes ramas. Estos divisores de potencia se pueden clasificar, a su vez, en divisores multimodo y divisores monomodo. En el caso de los divisores multimodo, el radio crítico para la división de potencia vendrá determinado por las condiciones de excitación de los modos guiados. Mientras que, en el caso de los divisores monomodo, es posible obtener el divisor de potencia con el radio deseado. Una descripción más amplia de ambos viene dada a continuación:

- Divisores de Potencia Monomodo (Single-Mode Power Dividers):** Dentro de este tipo de divisores de potencia se encuentran a su vez varios. El primero se corresponde con las guías de onda ramificadas (*Branching Waveguides*). En este tipo, Figura (47), se tiene una guía lineal con entrada cónica, con un ángulo de conicidad θ_t . De esta manera, el modo guiado fundamental que incide sobre ella, se propagará de forma suave, sin convertirse en un segundo modo. En cuanto a las pérdidas por dispersión en este tipo de componente, podrán ser optimizadas utilizando el valor adecuado del ángulo que se forma entre las ramas, θ_B . Según aumenta ese ángulo las pérdidas también aumentarán. Si las ramas son simétricas se espera que la potencia a la salida en todas ellas (2 o más) sea la misma; mientras que si no son simétricas, la relación entre las potencias de salida viene determinada por el ángulo que formen entre las ramas.

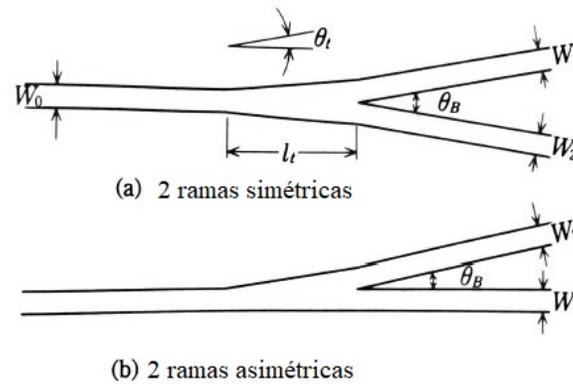


Figura 47: Guía ramificada de forma simétrica (a) y de forma asimétrica (b) [7]

Dentro de los divisores de potencia monomodo también es posible encontrar acopladores direccionales y acopladores direccionales con espaciado variable. Este tipo de acopladores se utilizan como divisores de potencia con pérdidas muy bajas. En la zona en la que se acopla, se tiene una guía de onda que soporta dos modos (tanto para los casos pares como impares). La longitud de acoplamiento viene dada por L , que es la diferencia entre las constantes de propagación de modos pares e impares; la longitud de la capa dieléctrica, l_c , tiene que ser ajustada para poder dividir la potencia de forma equitativa. En el caso de que el espaciado sea variable, simplemente se requerirá una separación uniforme entre las guías; es preciso recalcar que la transferencia de la intensidad tiene lugar en la misma dirección que la dirección en la que se está propagando la onda. Las pérdidas podrán minimizarse controlando tanto los ángulos que se forman entre las ramas, como el espaciado.

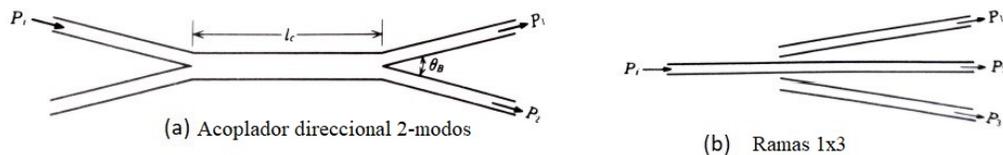


Figura 48: Acoplador direccional (a). Acoplador direccional espaciado variable (b) [7]

- Divisores de Potencia Multimodo (Multimode Power Dividers):** En este tipo de divisores, la razón existente entre las potencias de salida de cada una de las ramas está determinada por las condiciones de excitación de los modos guiados. Será preciso establecer una conexión entre la zona en la que se mezclan todos los modos y la región en la que se encuentra la división en múltiples ramas. La zona en la que se juntan los diferentes modos cobrará especial importancia

en estos dispositivos, en ella deberán excitarse todos los modos guiados con la misma amplitud. De esa forma sería posible que la potencia de salida en las diferentes ramas fuera igual. Dentro de esta región intermedia se tiene que el diseño de la misma se basa en el trazado de rayos. Cuando un haz incide en esta región, será expandido por difracción y, posteriormente, tendrán lugar múltiples reflexiones en sus bordes; si la longitud de esta zona es la adecuada será posible excitar todos los diferentes modos guiados que aparezcan en ella, que se dirigirán a la salida por las diferentes ramas.

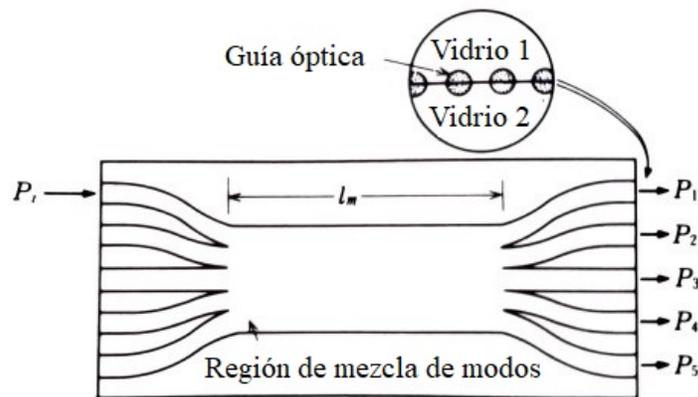


Figura 49: Ejemplo de Divisor de Potencia Multimodo [7]

3.3.3. Otros Tipos de Componentes en Circuitos Ópticos Integrados

A parte de los dispositivos mencionados en los apartados anteriores, existen muchos más que pueden ser introducidos en los circuitos integrados. Algunos ejemplos son [7] [27]:

- **Polarizadores y Separadores de Modo** (*Polarizers and Mode Splitters*): Este tipo de dispositivos serán relevantes para poder obtener el máximo rendimiento y una buena funcionalidad de los circuitos. En general, en la conexión de fibras ópticas con las guías se necesita tener una polarización lineal para guiar un modo en particular, sin embargo, la luz incidente suele estar polarizada elípticamente, de ahí la relevancia de los polarizadores. Por otro lado, para conseguir un funcionamiento óptimo, a veces es necesario eliminar uno de los modos ortogonales (TE o TM), para permitir diferentes caminos ópticos, de esta forma, el splitter también será necesario.
- **Multiplexores y Demultiplexores de Longitud de Onda** (*Wavelength Multiplexers and Demultiplexers*): Este tipo de componentes permitirá separar espacialmente una onda guiada, que esté compuesta por varias longitudes de onda, en cada una de las diferentes λ . Son dispositivos

relevantes en aplicaciones como la comunicación, ya que permiten emitir y recibir señales, que con la ayuda de estos componentes y una serie de filtros para las diferentes longitudes de onda, podrán ser diferenciadas y reemitidas por distintos canales. En concreto, lo que permiten los multiplexores y demultiplexores es, combinar o dividir señales respectivamente.

- **Lentes de Guía de Onda** (*Waveguide Lenses*): Las lentes también jugarán un papel importante en el funcionamiento de los circuitos. En concreto, son componentes ópticos relevantes a la hora de la creación y procesado de imágenes. Fijándose en los trazados de los haces, las lentes serán útiles tanto en la expansión de los mismos como en su colimación. Pero, el papel más importante que tendrán las lentes en estos dispositivos es la capacidad para procesar las señales ópticas.

Finalmente, cabe destacar que todos los dispositivos mencionados, tanto en este apartado como en los anteriores, son componentes pasivos, ya que estaban relacionados con características ópticas pasivas de las ondas. Sin embargo, también existen componentes que no son pasivos, denominados componentes funcionales, y serán aquellos que permitan tener un control óptico. El control óptico que permiten los componentes funcionales, se realiza mediante fenómenos físicos producidos de forma externa. Es decir, permitirán aplicarles señales externas y los comportamientos del sistema variarán de acuerdo a lo requerido. Cabe destacar que, fundamentalmente son componentes ópticos que a su vez tienen componentes eléctricos, aunque no tienen por qué ser exclusivamente éstos últimos. Los dispositivos que se pueden encontrar en estos casos, a parte de electroópticos, podrán ser acustoópticos o magnetoópticos. El comportamiento óptico será regulado, entonces, por señales externas eléctricas, acústicas o magnéticas, respectivamente.

3.4. Aplicaciones de los Circuitos Ópticos Integrados

Los diferentes diseños, los numerosos materiales, las distintas técnicas de fabricación, los procesos de optimización, ... que se han ido desarrollando hasta el momento, están condicionados por la aplicación particular a la que esté destinado el circuito óptico integrado. Por su parte, las aplicaciones de estos circuitos están destinadas a la mejora de la resolución de algunos problemas, o a la mayor eficiencia y rendimiento de los dispositivos tecnológicos en los que están involucrados estos circuitos.

Algunas aplicaciones a las que están destinados los circuitos ópticos integrados son [1] [18]:

- **Analizadores de Espectros de Radiofrecuencia:** Una de las aplicaciones de estos dispositivos es la de analizador de espectros de radiofrecuencias (*RF spectrum analyzer*) en tiempo real.

Consistiría en una fuente de luz láser, acoplada a una guía de onda plana, y siendo colimada por una serie de lentes y un modulador acustoóptico, tal y como se muestra en la Figura (50). La señal de radiofrecuencia que se quiere analizar, al pasar por el dispositivo descrito anteriormente, produce una serie de ondas de sonido, que variarán su periodo a lo largo del tiempo. El ángulo de desviación sufrido por el haz incidente será en función de la señal de radiofrecuencia. Posteriormente, se utilizará una segunda lente para llevar la luz al fotodetector, en el cual cada una de sus partes estará asociada a una frecuencia determinada, permitiendo así su análisis.

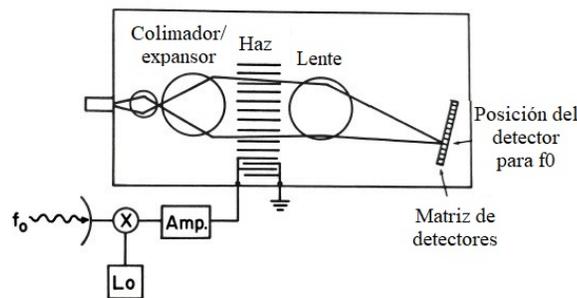


Figura 50: Esquema de un analizador de espectro de RF [18]

- **Industria Automovilística:** Los diferentes asistentes y automatizaciones, necesitan dispositivos tecnológicos de rápida detección y respuesta a la hora de la conducción. Para ello, tiene lugar el empleo de circuitos fotónicos integrados, que se utilizan a modo de sensor en aquellos procesos que lo requieran.
- **Detección y Medición de la luz (LIDAR):** Es posible emplearlos como detectores y medidores de luz. Lo que se pretende en estos casos es detectar los cambios de frecuencia de las ondas, al alejarse o acercarse al detector, lo que permitirá conocer el desplazamiento o la distancia. Además, permite evitar interferencias con otras fuentes. Son sistemas con alta resolución, que requieren un láser, altamente coherente y modulado con precisión, como fuente y un microrresonador dentro de un dispositivo fotónico.
- **Aplicaciones Médicas:** Muchos dispositivos para el diagnóstico podrían ser mejorados mediante la utilización de dispositivos fotónicos. Al interactuar la luz con los diferentes tejidos, se producen respuestas, también distintas en función de qué esté compuesto cada tejido. Sensores basados en analizar esta luz pueden emplearse para detectar anomalías. El empleo de circuitos integrados permitirá, a su vez, rebajar los costes, los tamaños de los dispositivos de detección y aumentar el rendimiento y la buena respuesta de los mismos.

- **Biosensores:** En relación con lo anterior, se puede aplicar ese tipo de sensores de forma más general, siendo útil un PIC para poder detectar distintas sustancias biológicas. La luz dentro del chip sigue un camino bien determinado. Un biosensor, que utiliza un circuito fotónico integrado, va a ser muy sensible a los cambios que se produzcan en la propagación de la luz, debido a la presencia y al contacto con algunos tipos de proteínas, permitiendo así su detección. Este tipo de sensores tiene, también, aplicación en diferentes campos como, por ejemplo, la industria alimentaria.

A parte de las aplicaciones mencionadas en este apartado, existen otras muchas aplicaciones directas de los circuitos integrados, entre las que se incluyen las telecomunicaciones, las redes o la computación cuántica. En cuanto a aplicaciones indirectas, a mayores escalas y con el empleo de múltiples dispositivos, aún existirán más. Lo que evidencia esto es que el estudio, la optimización y la mejora de este tipo de sistemas repercute, claramente, y de forma positiva, en diversos campos de aplicación.

3.5. Características del Dispositivo Estudiado Experimentalmente

El dispositivo que se va a estudiar experimentalmente es un circuito fotónico integrado (o chip) fabricado sobre una plataforma de nitruro de silicio (Si_3N_4), que se va a caracterizar en el espectro visible. En concreto, el dispositivo está dividido a su vez en 6 chips completamente iguales y numerados, tal y como se muestra en la Figura (51). Esa disposición de la numeración es a la que se hace referencia en los resultados, cuando se especifican los valores obtenidos para un chip determinado.

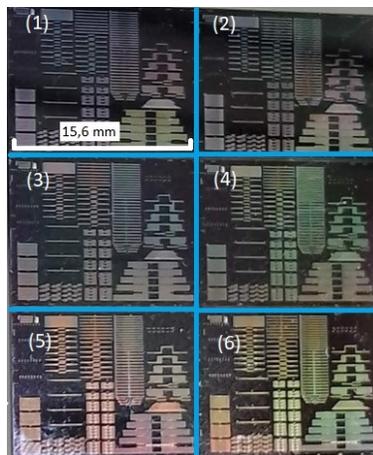


Figura 51: Imagen real del chip, junto con la numeración de los chips estudiados experimentalmente

Cada una de esas seis partes en las que está dividido están formadas por una serie de componentes. Todos ellos tienen en común el empleo de guías ópticas para el transporte de la luz y un grating como

elemento para conseguir el acoplamiento, pero en cada una de ellas llegarán a la salida diferentes potencias ópticas. Esto se debe a las particularidades de cada una de ellas, es decir, integradas en el chip no solo existen guías rectas (A), sino que también hay presentes otros tipos de componentes. Algunos de estos son las guías curvas (B), que serán interesantes para evaluar las pérdidas en ellas, ya que destacan las pérdidas por radiación y es una forma de comparar ese tipo de pérdidas con otras. Otro de los componentes que están integrados en este circuito son los *splitters* (C), en los cuales debería verificarse que la potencia de salida sea la misma en ambas ramas. Es destacable, también, la presencia de los interferómetros multimodo o MMI (*Multi-mode Interferometer* (D)), los cuales permiten la interferencia entre varios modos guiados y generan la división de la luz en varios caminos o su recombinación en uno solo. Un nuevo componente es el anillo resonador (E), que forma un circuito cerrado, que a su vez da lugar a unas zonas de resonancia asociadas a unas longitudes de onda determinadas. Finalmente, los interferómetros Mach-Zehnder (F) son otros de los elementos que incluye el chip estudiado, éstos van a dividir el haz en dos, para posteriormente volver a recombinarse, suelen emplearse para mediciones de cambios de fase. Una vista general de los componentes del chip viene dada en la Figura (52), en la que se muestra su *layout*.

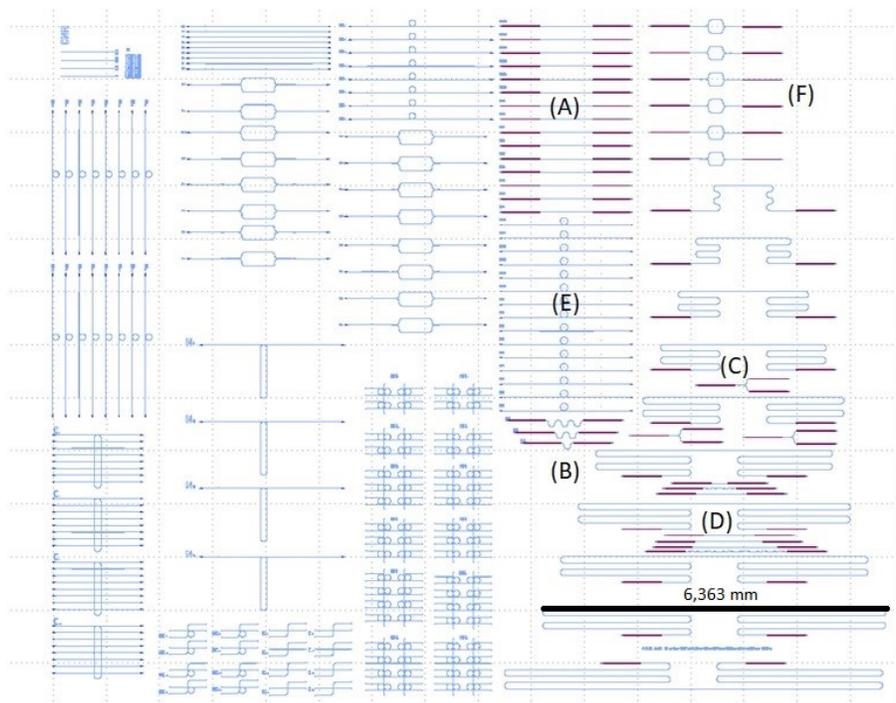


Figura 52: Layout del chip estudiado experimentalmente

Los componentes anteriores no van a ser estudiados todos de forma experimental, únicamente aquellos

especificados en (4). En cuanto a estos últimos es posible comentar algunas de sus características [28]:

- **Guías Ópticas:** El elemento fundamental en este tipo de circuitos son las guías ópticas. En este caso, en la parte experimental se va a intentar acoplar la luz en guías ópticas cuya sección transversal tienen el siguiente perfil:

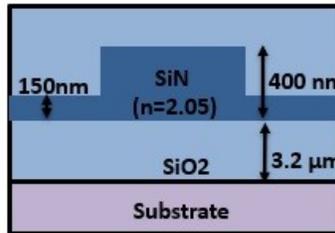


Figura 53: Perfil de las guías ópticas integradas en el chip [28]

Su fabricación se basa en un proceso determinado por ciclos térmicos (*thermal cycling*) [3]. El método consistiría en sustraer partes de la capa depositada a partir de esos ciclos térmicos, para intentar producir capas estequiométricas de Si_3N_4 sobre obleas de óxido de silicio. En este caso particular, el grosor de las capas viene dado en la Figura (53). Para aumentar su resistencia se generan esa especie de trincheras que evitan la formación y la propagación de grietas en la oblea.

- **Gratings:** La luz será acoplada con gratings, que han sido diseñados y fabricados para un ángulo óptimo de incidencia a 14° . En cuanto a sus dimensiones, el grating fabricado es cuadrado, con 12 micras de alto y 12 de ancho, siendo el espaciado entre rejillas 0,2 micras. La eficiencia de este tipo de acopladores varía, teóricamente, entre el 10 y el 30 %. El esquema del grating se puede observar en la Figura (56).
- **Guías curvas:** Las guías curvas no solo van a aparecer por separado para su análisis, sino que son una de las estructuras básicas en otros componentes del chip. Una de las características principales de cualquier guía curva es su radio de curvatura, en este caso, para cualquiera de las curvas existentes en estructuras analizadas, el radio es de 60 micras. Las pérdidas esperadas son bajas.

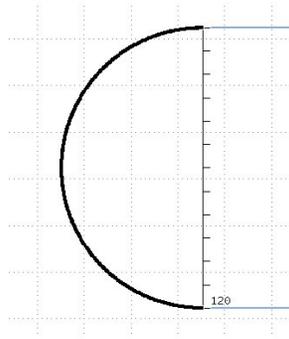


Figura 54: Diámetro de una de las secciones curvas de las guías

- MMI:** Finalmente, las últimas estructuras que se van a caracterizar son los interferómetros multimodo. Estas estructuras, tal y como ya se ha mencionado en este apartado, la parte central permite la propagación de diferentes modos guiados, los cuales interfieren entre sí, de forma que la potencia óptica se divide en diferentes caminos. En este caso, la interferencia entre los modos generará la división de la luz en dos ramas; aunque, también, tendrá lugar el proceso inverso, es decir, la recombinación, en un solo haz. La estructura y las dimensiones de los MMI que se van a estudiar experimentalmente, vienen dados por la esquematización de la Figura (55). En cuanto a las pérdidas en estos componentes, puede verse su tendencia en la gráfica de la Figura (55), donde la pérdida experimentada es dependiente de la longitud de la zona de interferencia. Estas pérdidas estarán estrechamente relacionadas con la interferencia constructiva o destructiva que se produzca. En concreto, fijándose en esa gráfica, la longitud de la zona de interferencia, L_{MMI} , de los MMI's integrados en el chip está optimizada para una longitud de $40 \mu m$; es decir, si esa zona mide $40 \mu m$ las pérdidas serán mínimas. Si la longitud de la zona de interferencia aumenta o disminuye, las pérdidas en estos componentes serán mayores.

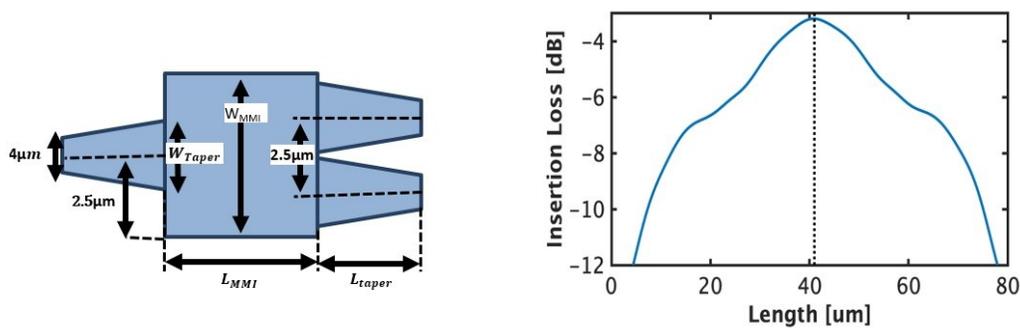


Figura 55: Dimensiones de los MMI y sus pérdidas en función de la longitud [28]

4. Caracterización en el Visible de un Chip de Si_3N_4

En las secciones anteriores se tiene una visión general de los conceptos y procesos que están involucrados en un dispositivo como el que se va a estudiar experimentalmente. Es relevante conocer, previamente, cómo diseñar y fabricar el dispositivo, cómo se propaga la luz en él, cómo poder acoplarla, cuáles son las pérdidas que experimenta en el proceso de acoplamiento y durante el guiado, entre otros muchos factores a tener en cuenta. Una parte fundamental en todo el proceso que se sigue para obtener un chip funcional es la caracterización.

La caracterización, bien sea de una única guía, o bien de un dispositivo más complejo como puede ser un circuito integrado, da lugar a una retroalimentación con las diferentes partes del proceso. Es decir, con la caracterización se pretende comprobar que las características de diseño que han sido llevadas al proceso de fabricación se cumplen o no, en otras palabras, si se ha conseguido un dispositivo óptimo tras la fabricación o, si por el contrario, aún es posible mejorarlo. En resumen, tras la caracterización es posible que ocurran varias cosas, una de ellas es que se corroboren las características óptimas para las cuales se diseñó el sistema, finalizando, así, el proceso. Otra de las posibilidades es que las pérdidas sean mayores a lo esperado y, por tanto, el rendimiento a la hora de ser utilizado disminuya, lo cual se traducirá en rediseñar o mejorar alguno de los componentes del sistema. También sería posible que los datos obtenidos experimentalmente no sean concluyentes, bien por la necesidad de más datos para obtener unos buenos resultados, o bien porque no es posible obtener los datos experimentales; en cualquier caso habrá que, de nuevo, rediseñar, mejorar o cambiar algo en el dispositivo para subsanar esta situación.

La parte experimental realizada consiste en caracterizar un chip de nitruro de silicio, en el espectro visible. Todas las demás fases del proceso ya han sido realizadas, siendo necesario, ahora, evaluar las distintas pérdidas que tiene el sistema y comprobar si se ajustan a lo esperado o no. En concreto, aunque el dispositivo está formado por más componentes, se van a analizar las pérdidas, solamente en 4 casos:

1. En primer lugar, se pretende saber cuáles son las pérdidas en el proceso de acoplamiento, que en este caso van a estar relacionadas con los gratings mediante los cuales se acopla la luz. La medida de las pérdidas en el acoplamiento puede realizarse con cualquier componente, ya que el grating tiene el mismo diseño y estructura en todas ellas. La forma de proceder en este caso será medir la potencia óptica de salida en la estructura en cuestión, para valores crecientes de

la longitud de la misma o para valores crecientes del número de componentes (por ejemplo, el número de curvas). Estableciendo la relación entre la pérdida de potencia (expresión (30)) y la longitud de la guía/número de componentes, se debería llegar a una tendencia lineal, donde la pérdida en los acoplamientos por grating viene dada para una longitud cero de la guía o para un número nulo de componentes, es decir, se corresponderá con la ordenada en el origen de la representación obtenida.



Figura 56: Estructura del grating

- Otra de las pérdidas de potencia óptica que se quiere conocer es la existente al propagarse la luz en las guías que se integraron en el chip. Una forma de conocer esas pérdidas, es cuantificarlas por unidad de longitud (en este caso por centímetro). Se procederá de forma análoga a las medidas anteriores. Se miden las potencias de salida en guías cuya longitud va aumentando, se obtienen las pérdidas a la salida con la expresión (30) y se representan frente a las longitudes asociadas (en centímetros), de esa manera, se puede asociar la pendiente de la representación gráfica con la pérdida existente, en las guías fabricadas, por unidad de longitud.

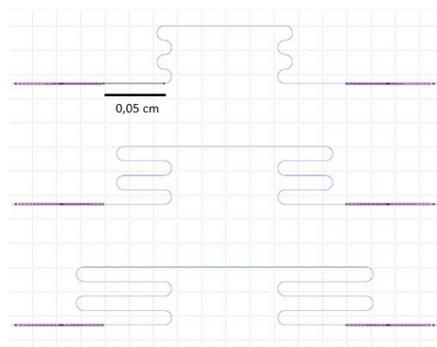


Figura 57: Algunas de las guías, con longitud creciente, medidas

3. En tercer lugar, se pretenden conocer las pérdidas en las secciones curvas de las guías. Las estructuras anteriores y otras de las estructuras que se encuentran integradas en el chip, tienen unas partes en las que las guías son curvas. En este tipo de guías, había un tipo de pérdidas que destacaba, las pérdidas por radiación. Para poder conocer el alcance de las mismas se debe seguir el mismo proceso que en los casos anteriores. Esta vez, la luz se acoplará en guías con un número creciente de secciones curvas, midiendo la potencia óptica a sus salidas; posteriormente, se estimará la pérdida sufrida a la salida mediante la ecuación (30) y se procederá a la misma representación que en los casos anteriores, pero en este caso frente al número de curvas. La gráfica resultante, dará lugar, de nuevo, a una tendencia lineal, cuya pendiente está asociada a las pérdidas existentes en la sección curva de la guía.

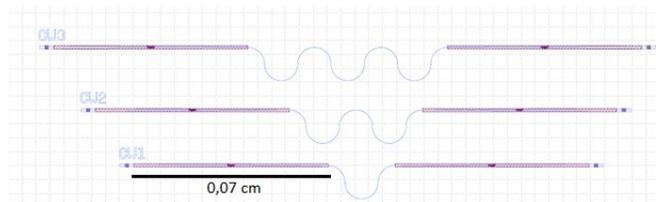


Figura 58: Estructuras que van incrementando el número de secciones curvas

4. Finalmente, otras pérdidas que serán estudiadas son las que se producen en los interferómetros multimodo (*multi-mode interferometer*) o MMI. En este caso se pretende conocer las pérdidas que tienen lugar al dividir en dos el haz incidente o al volver a juntarlos en uno solo, mediante el uso de los interferómetros multimodo. Para conocer estas pérdidas, vuelve a ser necesario emplear varias estructuras en las que el número de MMI's vaya aumentando progresivamente. Acoplado la luz por un extremo de la guía, en la que se encuentran este tipo de interferómetros, y extrayendo la luz por el otro extremo, será posible cuantificar la potencia óptica recogida a la salida, la cual puede relacionarse con las pérdidas (en dB) mediante la expresión (30). Representando en este caso las pérdidas frente al número de MMI's, de la pendiente del ajuste lineal, será posible conocer la pérdida que tiene lugar en cada una de estas estructuras.

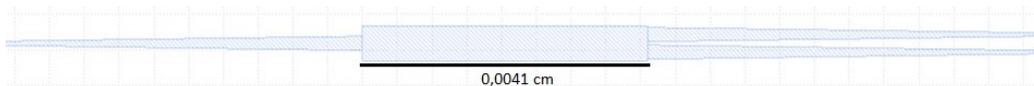


Figura 59: Estructura de un interferómetro multimodo

4.1. Dispositivo Experimental y Procedimiento

Para llevar a cabo la parte experimental, será necesario el montaje de una serie de dispositivos, así como seguir una serie de pasos, para llegar a los resultados que permitan conocer las pérdidas existentes en el sistema.

4.1.1. Dispositivo Experimental

En la Figura (60) se puede apreciar una vista general del montaje experimental utilizado para la caracterización del chip. En ese montaje se incluyen componentes como el láser; el medidor de potencia y energía óptica, así como los diferentes sensores que necesita; cables de fibra óptica, junto con diferentes conectores, que harán de nexo entre las fibras y otros componentes; unos polarizadores; una cámara; y, por supuesto, el chip, junto con las diferentes estructuras de soporte. Será necesario que todos ellos estén dispuestos de forma que permitan tanto el acoplamiento, como que la potencia de salida sea la máxima posible.

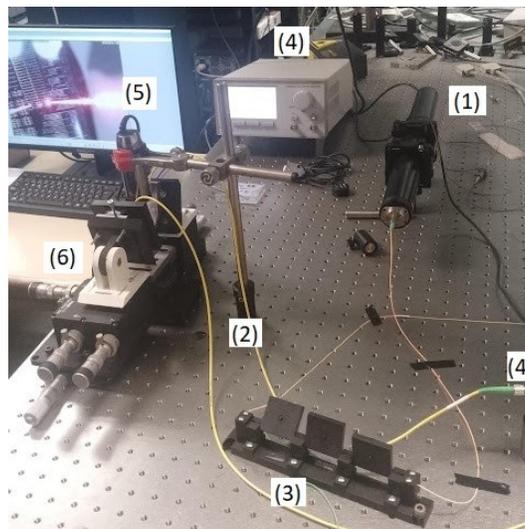


Figura 60: Visión general del dispositivo experimental

Una descripción más detallada viene dada a continuación:

1. **Láser:** Como fuente de luz se va a emplear un haz láser. Como la caracterización del chip es en el espectro visible, el haz láser emitirá luz roja, con una longitud de onda de $\lambda = 633 \text{ nm}$ y con una potencia de salida en torno a los 1,5 mW.

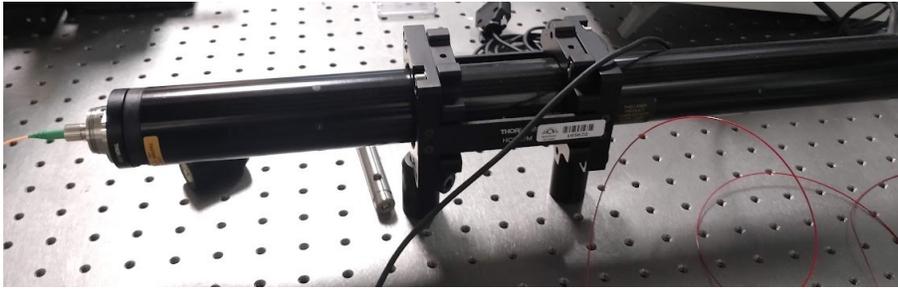


Figura 61: Fuente de luz para la caracterización: Haz Láser

- 2. Cables de Fibra Óptica y Conectores:** Se van a emplear 3 cables de fibra óptica. El primero de ellos se encuentra conectado directamente a la salida de la fuente de luz. El camino de este primer cable pasa por una serie de polarizadores y termina uniéndose al segundo cable de fibra óptica mediante un conector PM. El segundo, es por el que se va a introducir luz al circuito, por tanto, por el otro extremo será necesario retirar todas las capas protectoras que lleva la fibra, y dejar, únicamente, el núcleo de la fibra óptica para que tenga lugar el acoplamiento. El tercer cable de fibra óptica se coloca a la salida de la luz del componente que se esté estudiando, por tanto, en ese extremo no contará con capas protectoras, por el mismo motivo que en el caso anterior. Finalmente, este último cable se llevará hasta el sensor, empleando, de nuevo, un conector.

Los conectores utilizados en las uniones son conectores PM. Estos conectores permiten mantener la polarización. Están formados por dos extremos opuestos (conector macho y hembra) que con el correcto posicionamiento de ambos, ayudan a minimizar las pérdidas en la inserción y mantener la polarización deseada.

Tanto los cables de conexión de tipo PM, como los conectores PM, son necesarios. Esto es debido a que el sistema es muy sensible a las variaciones de polarización, y al encontrarse las fibras curvadas o tensionadas, es inevitable que no surjan cambios en la polarización de la luz que viaja por ellas. Así pues, usando este tipo de cables y conectores, este problema podrá controlarse.

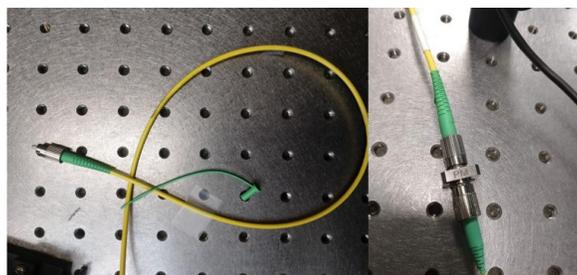


Figura 62: Cable de fibra óptica y conector PM

3. **Polarizadores:** Se va a disponer de 3 polarizadores por los que pasará la fibra. Variando su posicionamiento permitirán obtener la polarización necesaria para tener la máxima potencia de salida posible.

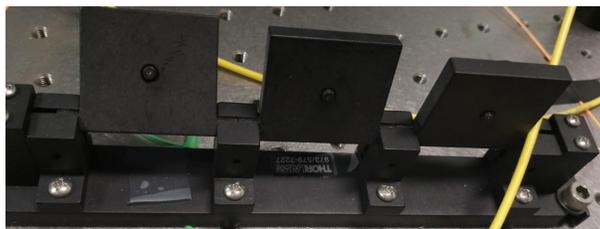


Figura 63: Polarizadores

4. **Medidor de Potencia y Energía Óptica. Sensores:** Para cuantificar los resultados de las pérdidas en el acoplamiento y en la propagación en las estructuras del chip, se utiliza un sensor (que debe ser adecuado para la λ en la que se trabaja). Éste último se encuentra unido al medidor de potencia óptica, gracias al cual será posible conocer la potencia de salida del sistema.



Figura 64: Sensor y medidor de potencia óptica

5. **Cámara:** La cámara se coloca sobre el chip a la hora de intentar acoplar la luz. Al tener los

componentes dimensiones milimétricas, la cámara (conectada mediante un puerto USB al ordenador), permite visualizarlos con mayor facilidad, favoreciendo, de esta forma, la tarea del acoplamiento.

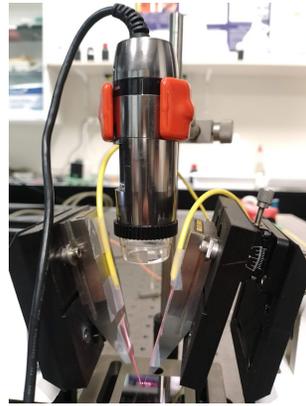


Figura 65: Cámara

6. **Estructuras de Soporte y Regulación:** En cuanto a las estructuras de soporte se tienen dos tipos. Una de esas estructuras es sobre la que se coloca el chip, ésta permite dos tipos de movimiento. Uno de ellos sirve para mover el chip hacia delante o hacia atrás (dirección y); el otro movimiento es el de rotación de la plataforma. La otra estructura en realidad serán dos, una para cada una de las fibras que se aproximan al chip. Estas estructuras permiten el correcto posicionamiento de las fibras ópticas; en concreto, son las encargadas de que las fibras incidan con el ángulo necesario para un acoplamiento óptimo. Además, con la ayuda de unos tornillos que tienen, es posible ajustar la posición de las fibras en la tres direcciones. Este ajuste puede ser más grueso o más fino, en función de si se está cerca de acoplar o no.

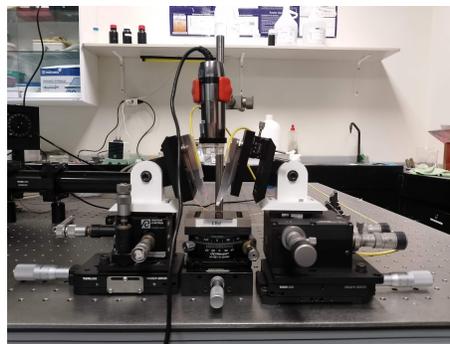


Figura 66: Estructuras de soporte y regulación

Una parte fundamental del dispositivo experimental, y que no ha sido mencionada, es el chip estudiado, cuyas características principales, junto con una descripción detallada de las mismas se encuentra en el apartado 3.5.

4.1.2. Procedimiento Experimental

Para llegar a los resultados finales, será necesario seguir una serie de pasos que se encuentran especificados en esta sección. En primer lugar, habrá que realizar una serie de ajustes en el dispositivo para poder obtener unos buenos resultados. Posteriormente, se tomarán los datos y, finalmente, se analizarán y se discutirán.

1. **Conexiones Previas:** En primer lugar, el láser se debe conectar a la fuente de alimentación. El resto de conexiones ya han sido adelantadas en 4.1.1. El principal objetivo es comprobar las pérdidas que tienen lugar en el chip, para ello será necesario que la luz llegue hasta él y se propague por él, llegando, finalmente, a un detector. Para que todo esto ocurra es necesario que una fibra, mediante un conector, sea colocada a la salida del láser. Esta misma fibra era la que se hacía pasar por el dispositivo con los polarizadores, para terminar uniéndola a la fibra desde la cual incidirá la luz en el chip. La tercera fibra recogerá la salida de luz del chip y se conectará al sensor que, a su vez, está unido al medidor.
2. **Colocación de las fibras:** Las fibras con las que se introduce o saca la luz del chip, deberán estar posicionadas de una manera concreta. En primer lugar, el extremo más próximo al chip debe estar desprovisto de todas las capas protectoras que lleva la fibra y cortado adecuadamente. Para pelar la fibra se emplea un pelacables especial para fibras ópticas como el que se muestra en la Figura (67, (a)). Se van retirando, capa por capa, desde la más externa a la más interna, hasta llegar al núcleo. Posteriormente, se corta el final de la fibra, para pulir bien la sección transversal de la misma. Se usará una cortadora de fibras, o *fiber cleaver* por su nombre en inglés, como la de (67, (b)), para esa última finalidad. Cómo de bueno sea el corte de la fibra va a influir en las pérdidas a la hora de acoplar luz con ella. El ángulo de corte no debe sobrepasar los $0,5^\circ$, la sección de la fibra tiene que ser plana, evitando cualquier tipo de irregularidad y defecto del núcleo, tal y como se muestra en (67, (c)). Una vez cortada se limpia y se comprueba, bien con la ayuda de un microscopio o bien observando la salida de luz por ella (completamente circular), que es un buen corte.

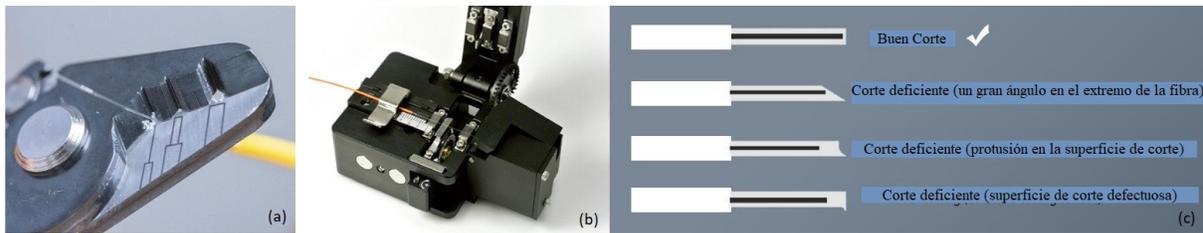


Figura 67: (a) Pelado de la fibra. (b) y (c) Cortado de la fibra [29]

Una vez terminado el proceso anterior, esos extremos de las fibras ópticas se deben colocar en el soporte, apoyando la mayor parte sobre él, pero no por completo. Además, se buscará que ambos estén, sobre el soporte, lo más rectos y centrados posible, tal y como se muestra en la Figura (68). Finalmente, se ajusta la inclinación del soporte, en este caso, por fabricación, el grating está optimizado para luz incidente a 14° , por tanto, se colocarán las fibras de manera que formen un ángulo de 14° con la vertical.

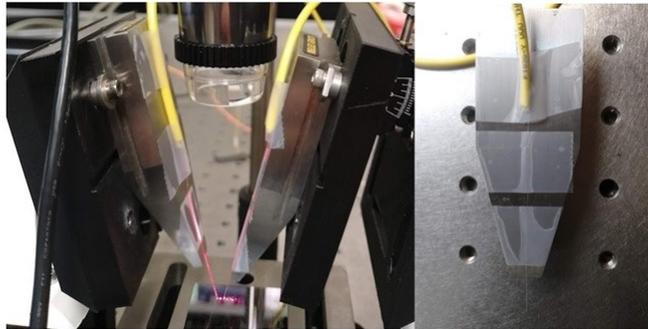


Figura 68: Colocación fibra

3. **Colocación del Chip:** La colocación del chip también va a ser importante a la hora de reducir las pérdidas de potencia a la salida. Para obtener un rendimiento óptimo es necesario que el chip se encuentre lo más recto posible sobre su base. Es decir, se busca que los lados del chip y de la plataforma sean paralelos dos a dos. Esta condición es necesaria, pero no suficiente, ya que, aunque el chip y la plataforma estén perfectamente alineados, pueden estar rotados con respecto a la posición de las fibras, que es por donde incide la luz. Entonces, para que esté completamente alineado, se empleará un tornillo que se encuentra en la base, y le permite a ésta rotar.

Cabe destacar que, como no se realizan las medidas todas en el mismo momento, y que cada vez que se va a medir, la posición del chip puede variar ligeramente y afectar a su eficiencia,

será necesario medir toda una serie de componentes el mismo día. Por ejemplo, si se están midiendo las pérdidas por unidad de longitud del chip 1, se necesita medir todas las guías en ese momento, sin variar la posición del chip, para que el ajuste posterior sea bueno. De esta manera, aunque la posición del chip no sea siempre la misma, si se recogen todos los datos necesarios para un ajuste, sin variarla, la pérdida que experimentan debido al posicionamiento es en todos la misma, manteniendo así la pendiente del ajuste lineal requerido.

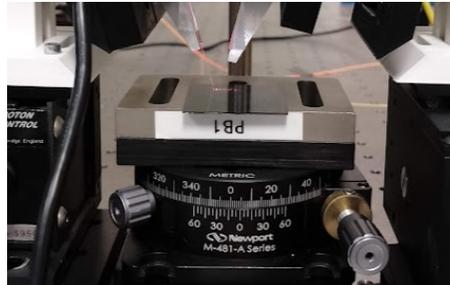


Figura 69: Posicionamiento del Chip

- Colocación de la Cámara:** Una vez ajustada la posición del chip, se colocará sobre él la cámara. Conectándola al ordenador y visualizando su interfaz en la pantalla, es posible enfocarla y posicionarla sobre la zona del chip que se quiere estudiar.
- Ajuste Grueso:** Para comenzar a acoplar la luz en la parte del chip deseada, será necesario variar la posición de la fibra óptica que está conectada a la fuente de luz. Eso será posible gracias a los tornillos micrométricos presentes en la estructura. En primer lugar, será necesario ajustar la altura, para ello, se acercará lo máximo posible la fibra al chip sin que choquen, para así evitar tanto daños en la fibra como en el chip. Posteriormente, se regularán las otras dos posiciones, moviendo la fibra de izquierda a derecha y de adelante a atrás, buscando que la guía óptica presente en el chip se ilumine tal y como se muestra en la Figura (70). Para acoplar la salida, se puede posicionar la guía “a ojo”, fijándose en qué posición aumenta la potencia registrada por el medidor. Otra opción es conectar la fuente de luz a la fibra del lado opuesto y proceder de forma análoga. Esta última opción resultará más sencilla, ya que es posible saber que se está cerca de acoplar la luz cuando la estructura del chip se ilumina.

Entrando en detalle en lo observado en la Figura (70) se puede apreciar uno de los aspectos fundamentales de la parte experimental: acoplar la luz en las guías que se encuentran integradas

en el chip. Yendo de izquierda a derecha, lo primero que aparece en la imagen es la fibra óptica (A), desde donde incide la luz. Ésta se encuentra, aproximada, lo máximo posible, al grating que se encuentra en ese extremo de la guía, desde el cual será posible el acoplamiento de la luz, y, por tanto, el guiado de la misma a través del interior de la guía.

La guía (B), en el caso de la imagen se correspondería con una de las guías mostradas en la Figura (57). Es posible apreciar en ella como, gracias a la correcta disposición de todos los elementos que forman parte del dispositivo experimental, la luz que sale del láser viaja a través de la guía; es decir, se puede ver, experimentalmente, cómo se están cumpliendo las condiciones para el confinamiento óptico y el guiado de la luz a través de la estructura (B).

Finalmente, también se puede observar en la Figura (70), como llega un punto en el que deja de estar iluminada (C). Ese punto se corresponde con el extremo final de la guía (B), el cual también presenta un grating análogo al del otro extremo, que permitirá extraer la luz de la guía. Colocando una fibra en (C), de la misma manera en la que está colocada la fibra (A), la luz se dirigirá por ella, permitiendo así, realizar las medidas experimentales deseadas.



Figura 70: Imagen real del acoplamiento de la luz en una guía

6. **Ajuste de la Polarización:** Cuando se tiene luz acoplada en una guía, es posible buscar la polarización requerida, independientemente de la guía en la que esté acoplada y del grado de acoplamiento. Simplemente, una vez realizado el proceso anterior, se vuelven a conectar una fibra a la fuente y otra al sensor, en ese punto se comenzará a variar la posición de los pola-

rizadores hasta obtener una potencia de salida máxima. Una vez realizado este ajuste, no será necesario volver a cambiar la colocación de los polarizadores.

7. **Ajuste fino:** Una vez posicionados correctamente todos los dispositivos involucrados en las medidas, se podrá realizar un ajuste más fino de las posiciones espaciales de las fibras. Para ello, se empleará la parte de los tornillos micrométricos que permite el ajuste fino, buscando, con esas pequeñas variaciones posicionales, una lectura que se corresponda con la potencia máxima de salida.
8. **Obtención de Datos:** Cuando la luz está acoplada en una de las estructuras del chip, va a dar lecturas de potencia máxima pero que fluctúan bastante, incluso hay variaciones del orden de $\pm 0,1 \mu W$. Por este motivo, se tomarán varias lecturas, en concreto tres y, posteriormente, se hará la media.
9. **Tratamiento de Datos:** El tratamiento de los datos estará analizado de forma más exhaustiva en el siguiente apartado (4.2). En una visión un poco más general de ello se tiene que hay que realizar la medida de longitudes/ número de curvas o MMI's, la medida de la potencia de entrada, las medidas de las potencias de salida y su correspondiente cálculo para conocer la pérdida de potencia, la realización del ajuste lineal relacionando las pérdidas con las longitudes o número de elementos, y la interpretación de los resultados.
10. Este proceso se repetirá para todos los componentes del chip que se quieren estudiar y para cada uno de los 6 chips de los que se dispone.

4.2. Resultados Experimentales

Una vez finalizada la recogida de datos, siguiendo los pasos del apartado anterior, los resultados para los diferentes componentes estudiados son los siguientes.

4.2.1. Pérdidas por Unidad de Longitud y Gratings

Para la obtención de estos resultados (Figuras (56) y (57)) ha sido necesario tomar diferentes valores. Tal y como ha sido mencionado anteriormente, para conocer las pérdidas de las diferentes estructuras, se necesita realizar la medida de las potencias ópticas a las salidas de las guías. Aunque también es preciso conocer otros valores.

En primer lugar, es necesario conocer qué estructuras se tiene y cuáles son sus dimensiones. Para este primer caso, se dispone de una serie de guías, que siguen el mismo patrón, pero su longitud es diferente, tal y como se aprecia en la Figura (71). En concreto son 10 guías, cuyos extremos (las zonas donde se encuentran los gratings) son exactamente iguales para cada una de ellas; además, todas tienen el mismo número de secciones curvas, cuyo radio también es igual en todos los casos. Lo único en lo que se aprecia diferencia es en la longitud de las zonas rectas de las guías, por lo tanto, el análisis se llevará a cabo teniendo en cuenta únicamente estas partes, ya que el resto de pérdidas que no se contabilizan son exactamente iguales en cada una de las guías (no variará la pendiente del ajuste, que es lo que realmente interesa). Para conocer esas longitudes se realizan las mediciones directamente sobre el *layout* del circuito. Éstas pueden realizarse de dos formas, o bien seleccionando la estructura en cuestión y viendo en sus especificaciones la longitud, o bien empleando la herramienta de la que dispone el programa *KLayout* para medir (regla); destacar que esta última opción será menos precisa.

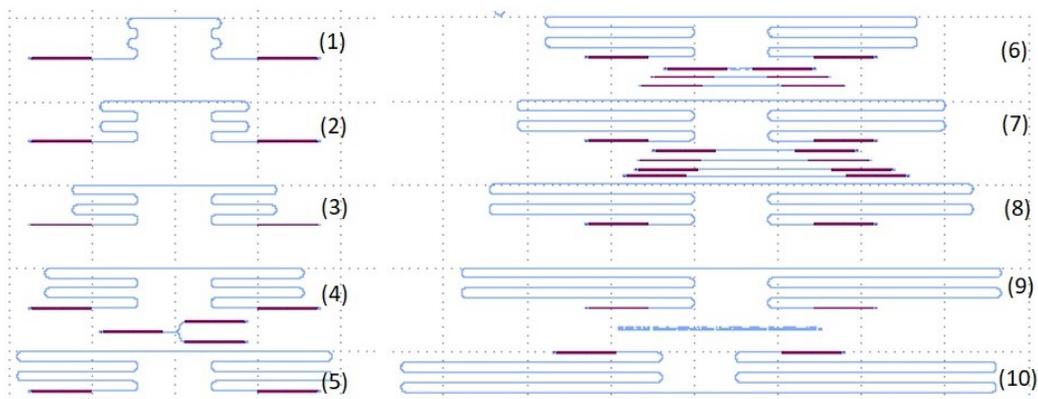


Figura 71: Guías empleadas para la determinación de las pérdidas por unidad de longitud y gratings

Las longitudes de las guías mostradas en la Figura (71) van desde 0,2 cm la guía (1), hasta 2,6 cm la guía (10); pasando por longitudes intermedias las demás guías: 0,47 cm (2), 0,73 cm (3), 1,00 cm (4), 1,27 cm (5), 1,53 cm (6), 1,80 cm (7), 2,07 cm (8) y 2,33 cm (9).

En segundo lugar, se medirá la potencia de entrada y de salida para cuantificar las pérdidas. Para conocer la potencia de entrada, se dirigirá directamente el haz procedente del láser al detector, obteniéndose un valor cercano a los $1500 \mu W$. En cuanto a la potencia de salida, se deberá tener conectada la fibra de salida al detector, una vez hecho esto, se debe anotar el valor de potencia máximo registrado en el medidor (teniendo en cuenta que la luz se encuentra en una situación de acoplamiento). Se va a observar que este valor fluctúa bastante, pero normalmente se mantiene cercano a un valor máximo.

Para obtener unos resultados más precisos, se realizará la medición 3 veces para cada una de las guías (desde la guía (1) a la guía (10)). El resultado que se utilizará, para cada una de las guías mostradas en la Figura (71), se corresponderá con la media de los tres valores obtenidos para la potencia de salida máxima. Una vez conocida la potencia de entrada (la misma en todos los casos), y la potencia óptica de salida (asociada cada una a una longitud determinada), se pueden conocer las pérdidas, asociadas a cada longitud, a partir de la expresión (30), que vendrán dadas en dB. La pérdida se representará en función de la longitud, esperando que éstas sigan una tendencia lineal, es decir, que las pérdidas sean proporcionales a la longitud. Los resultados, se muestran en la Figura (72), donde se representa la pérdida asociada a cada una de las 10 longitudes en función de éstas, para cada uno de los 6 chips. En cuanto a la pérdida de los gratings, son las pérdidas asociadas al proceso de introducción y extracción de la luz de la guía. Habrá dos gratings en cada guía, para estos dos fines, respectivamente. Si la longitud de las guías fuese cero, las pérdidas medidas se corresponderían con las de estas estructuras (ordenada en el origen de los ajustes).

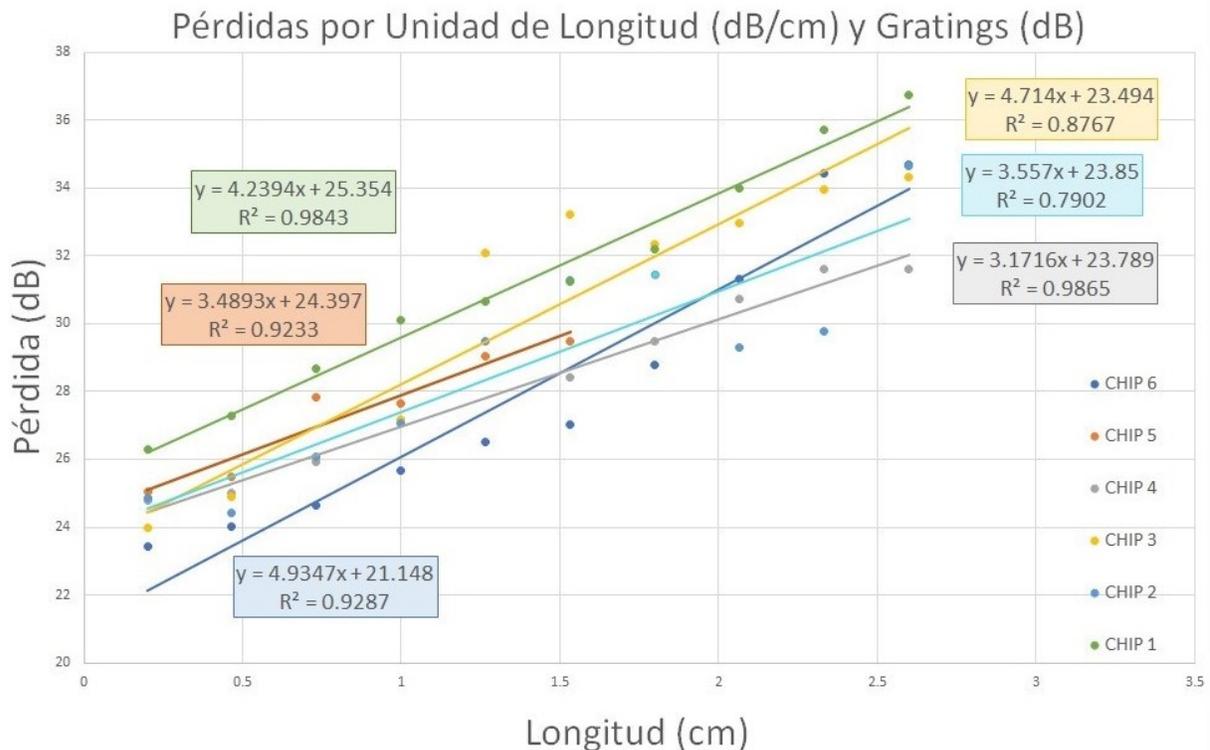


Figura 72: Representación de las pérdidas en función de la longitud de la guía

De la representación anterior se obtienen los resultados mostrados en la Tabla (1), donde la pérdida en las guías por unidad de longitud viene dada por la pendiente de los ajustes, y las pérdidas en los

gratings y las curvas sería la extrapolación a longitud cero, es decir, la ordenada en el origen de los ajustes lineales.

Chip	Pérdida en las Guías (dB/cm)	Pérdida Gratings + Curvas (dB)
1	$4,2 \pm 0,2$	$25,4 \pm 0,3$
2	$3,6 \pm 0,7$	$23,9 \pm 1,0$
3	$4,7 \pm 0,6$	$23,5 \pm 1,0$
4	$3,2 \pm 0,2$	$23,8 \pm 0,3$
5	$3,5 \pm 0,5$	$24,4 \pm 0,5$
6	$4,9 \pm 0,5$	$21,1 \pm 0,8$

Tabla 1: Valores obtenidos para las pérdidas por unidad de Longitud y para los gratings y curvas

Una vez obtenidas las pérdidas en todos los chips, la media ponderada junto con su incertidumbre, para las pérdidas por unidad de longitud es:

$$L_{guia} = 3,80 \pm 0,13 \text{ dB/cm}$$

En cuanto a las otras pérdidas, aunque realmente se corresponden con las pérdidas de los gratings y de las curvas, las pérdidas experimentadas en las curvas son despreciables frente a las de los gratings. Entonces, se puede considerar que el resultado es aplicable a las pérdidas producidas en el acoplamiento y desacoplamiento en los gratings (recalcar que está multiplicada por 2 la pérdida, porque hay dos gratings, la de uno solo sería la mitad). La media ponderada y su incertidumbre son:

$$L_{grat} = 24,33 \pm 0,18 \text{ dB}$$

Cabe destacar que los resultados en el cuarto chip están calculados sin los valores de la 4ª y 5ª guía, donde no fue posible acoplar la luz, esto podría deberse a algún fallo de fabricación o a algún deterioro, posterior, de la estructura. En cuanto al quinto chip, a partir de la 7ª guía tampoco fue posible el acoplamiento. Aún así, los valores obtenidos para las pérdidas se pueden considerar satisfactorios. Ya que si se comparan con los resultados obtenidos para otros estudios similares, en los que se caracteriza un chip de forma parecida y se buscan las pérdidas por unidad de longitud, como es el caso de los resultados mostrados en [2], las pérdidas obtenidas en las guías están en torno a los 3 dB/cm.

4.2.2. Pérdidas de las Curvas

Para llegar a estos resultados (Figura 58), al igual que en el caso anterior, también es necesario tomar diferentes valores. En primer lugar, se necesita conocer el número de curvas que hay en cada una de las 3 guías a estudiar, éstas se pueden apreciar en la Figura (73). Las secciones curvas a las que se hace referencia son aquellas análogas a la parte sombreada en negro en la Figura (73). El contaje del número de curvas es posible realizarlo, de nuevo, sobre el *layout* del circuito. En concreto, se pueden apreciar una serie de secciones curvas, idénticas a la sombreada en negro, que van aumentando en cada una de las guías. En la más corta hay 4 curvas, en la siguiente hay 8 curvas y en la más larga hay 12. Al igual que en las guías estudiadas con anterioridad, todos los gratings tienen las mismas dimensiones en cada una de las guías curvas, entonces con obtener los resultados en función del número de curvas será suficiente (la pendiente del ajuste no se verá afectada, y, vuelve a ser lo que realmente interesa).

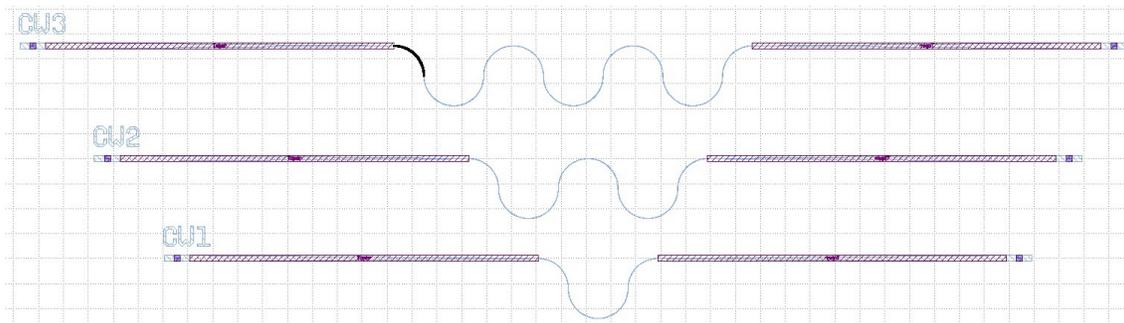


Figura 73: Guías empleadas para conocer las pérdidas asociadas a las secciones curvas

El segundo paso, al igual que en las otras guías, es seguir el procedimiento descrito en (4.1.2). Para cuantificar las pérdidas, vuelve a ser necesario conocer la potencia de entrada en las guías (de nuevo, $1500 \mu W$), y, también la potencia máxima de salida en las 3 guías curvas. Otra vez, vuelve a ser un valor que oscila bastante, por lo que se buscará mayor precisión tomando las medidas tres veces para cada una de las 3 guías, obteniendo así, 3 valores para la potencia máxima de salida, para cada número de curvas concreto. Se volverá a calcular la media y a emplear la expresión (30) para conocer las pérdidas, medidas en dB. El proceso se repetirá para cada uno de los 6 chips. Una vez representadas las pérdidas frente al número de curvas (Figura (74)), los resultados obtenidos son los siguientes:

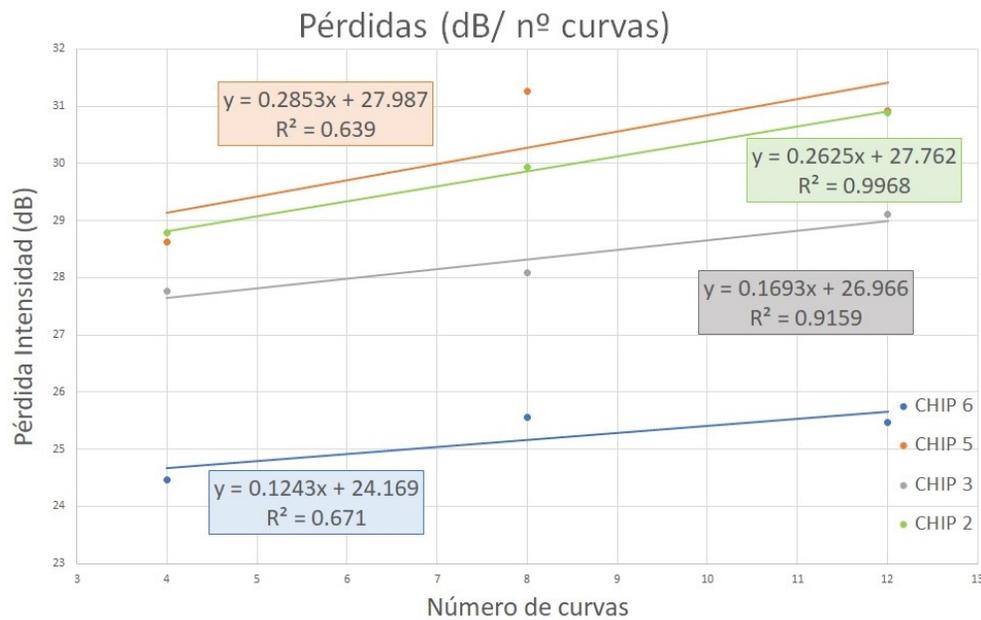


Figura 74: Representación de las pérdidas en función del número de curvas en la guía

De forma análoga al caso anterior, las pérdidas por número de curvas vienen dadas por las pendientes de las regresiones lineales mostradas en (74). Mientras que las ordenadas en el origen, se corresponderán, aproximadamente, con las pérdidas de los dos gratings (número de curvas 0). Estos resultados se encuentran desglosados en la Tabla (2).

Chip	Pérdida en las Guías (dB/curva)	Pérdida Gratings (dB)
2	$0,26 \pm 0,02$	$27,76 \pm 0,13$
3	$0,17 \pm 0,05$	$27,0 \pm 0,4$
5	$0,3 \pm 0,2$	$28,0 \pm 1,9$
6	$0,12 \pm 0,09$	$24,2 \pm 0,8$

Tabla 2: Valores obtenidos para las pérdidas por número de curvas y gratings

A partir de los resultados anteriores, el valor de la media ponderada y su incertidumbre, para las pérdidas experimentadas en función del número de curvas es:

$$L_{curv} = 0,24 \pm 0,02 \text{ dB/curva}$$

Para las pérdidas de los gratings, se ha obtenido, en este caso, un valor algo superior:

$$L_{grat} = 27,61 \pm 0,12 \text{ dB/curva}$$

Es preciso mencionar que los ajustes para el chip 1 y el chip 4 no fue posible realizarlos. En cuanto al chip 1, los valores obtenidos son los presentes en (75), donde se aprecia, claramente, que no es posible realizar un ajuste lineal. Lo ocurrido con el chip 4 es que, aunque se conseguía acoplar la luz, la potencia de salida estaba muy por debajo de lo normal, en torno a $0,1 - 0,2 \mu W$. De nuevo este tipo de problemas podrían estar relacionados con la fabricación o con deterioros posteriores de las estructuras.

Otro aspecto a resaltar es que, aunque sí se comienza a observar una tendencia creciente de las pérdidas al aumentar el número de curvas, los ajustes no son muy buenos. Algunos de ellos presentan coeficientes de correlación cercanos a 0,6, lo cual permite concluir que, para una mejor evaluación de las pérdidas, será necesario incluir más datos en los ajustes. Para ello será necesario diseñar y fabricar nuevas guías con un mayor número de curvas. Aún así, con estos datos, ha sido posible corroborar que las pérdidas en las curvas son bajas en comparación con las pérdidas de los gratings.

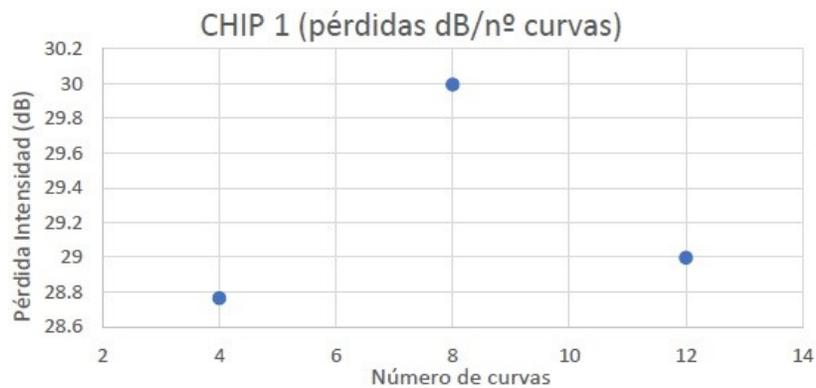


Figura 75: Representación de las pérdidas en función del número de curvas en el chip 1

4.2.3. Pérdidas de los Multi-Mode Interferometers (MMI's)

La última estructura analizada son los interferómetros multimodo (Figura 59). De nuevo, se requerirá conocer, previamente, el número de MMI's que hay en cada guía, para, posteriormente, evaluar las pérdidas en función cuántas estructuras de este tipo haya en la guía. Estas estructuras se van a encontrar en guías ópticas rectas, cuya longitud va a ser creciente, debido a la mayor presencia de interferómetros multimodo en ellas. Esto último es posible apreciarlo en la Figura (76). En concreto, hay 7 guías, la más corta tiene 2 MMI's (1), la siguiente tiene 4 (2), las dos siguientes tienen 6 MMI's cada una (3) (4), en la próxima más larga es posible ver 8 MMI's (5), la siguiente está formada por 10 interferómetros

multimodo (6) y la más larga tiene 12 MMI's (7).



Figura 76: Guías empleadas para conocer las pérdidas de los MMI's

Las medidas se toman de forma análoga a los dos casos anteriores. Se mide la potencia de entrada ($1500 \mu W$) y las potencias de salida, siguiendo los pasos de (4.1.2). Las medidas se vuelven a tomar 3 veces, para unos mejores resultados. Se estiman las pérdidas empleando, de nuevo, la expresión (30), junto con la media de las potencias máximas de salida, asociadas a un número particular de MMI's. Las representaciones de las pérdidas en función del número de interferómetros multimodo vienen dadas en las Figuras (77), (78) y (79). Lo que se observa en esas representaciones es que los valores obtenidos para las potencias de salida, y por tanto para las pérdidas producidas, fluctúan bastante. No siguen una tendencia lineal, como en los otros dos casos analizados, en ninguno de los chips. Por ese motivo, no son posibles los ajustes.

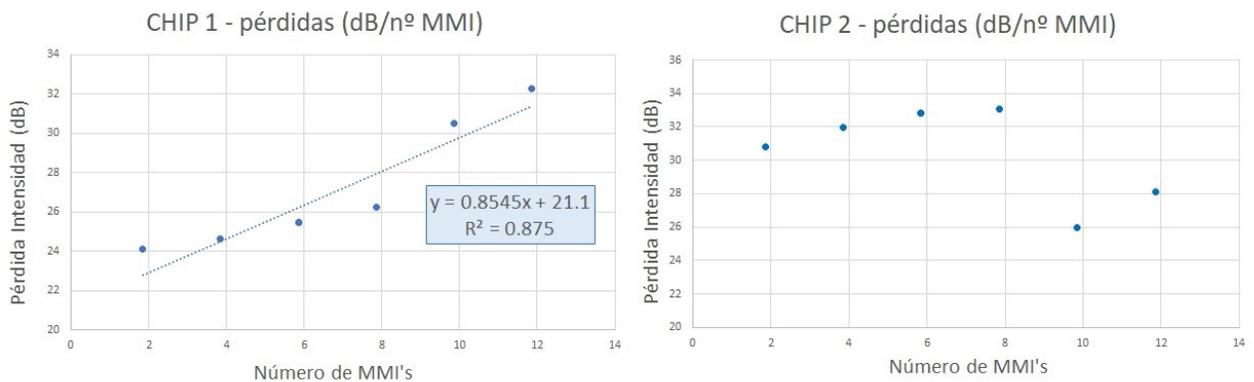


Figura 77: Representación de las pérdidas en función del número de MMI's en el chip 1 y 2

Lo que cabía esperar era que, al ir incrementando el número de MMI's, las potencias medidas disminuyesen, aumentando así las pérdidas. Esto es así porque, estos interferómetros multimodo lo que

hacen es coger un haz y dividirlo en dos; o al contrario, lo que había dividido en dos volver a juntarlo. En esos procesos tienen lugar una serie de pérdidas, y cuantas más veces se realice el proceso (mayor número de MMI's presentes en la guía), estas pérdidas se irán acumulando y aumentando. Sin embargo, los resultados obtenidos no permiten concluir que esto último sea así, al no seguir esa tendencia las representaciones. Las posibles explicaciones al porqué de este resultado vuelven a ser los fallos en el diseño o la fabricación, ya que las mediciones fueron realizadas varias veces, en concreto 3, y los resultados obtenidos fueron parecidos. Una posibilidad para poder comprobar la tendencia del sistema sería añadir, de nuevo, más estructuras con un número creciente de MMI's, para ver si de esa forma el ajuste es posible.

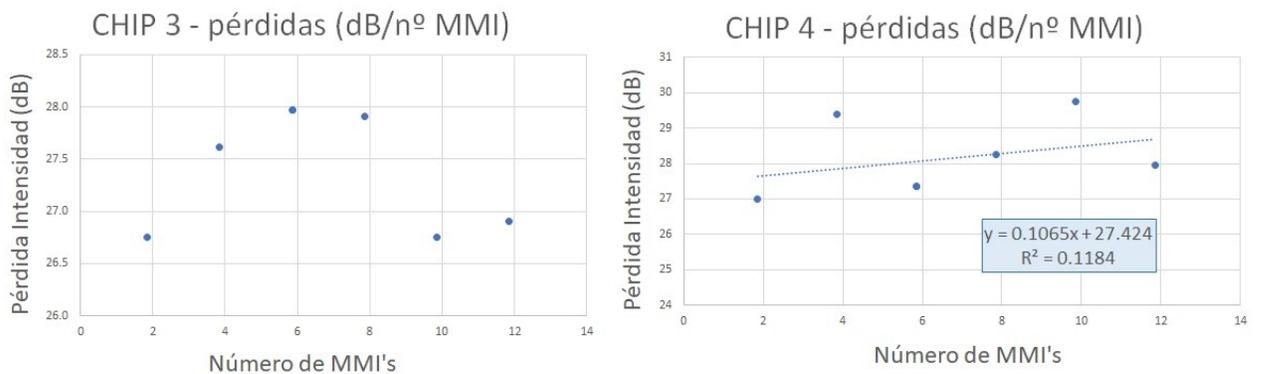


Figura 78: Representación de las pérdidas en función del número de MMI's en el chip 3 y 4

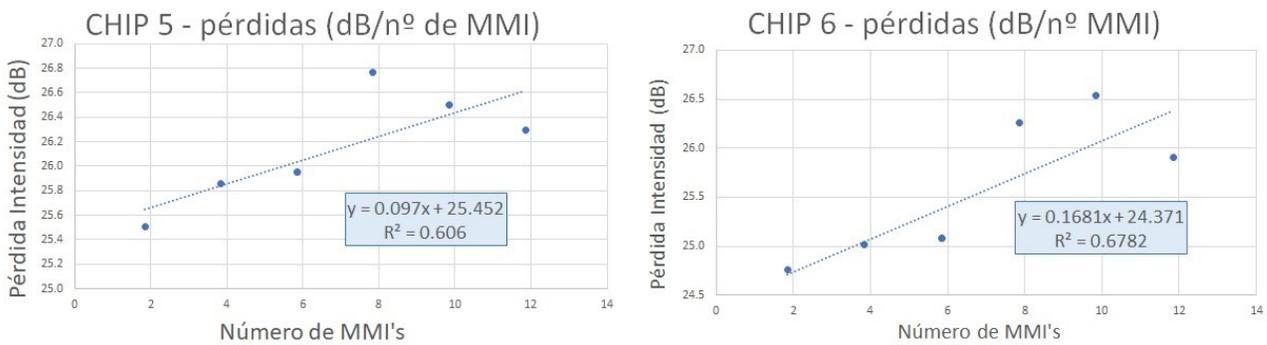


Figura 79: Representación de las pérdidas en función del número de MMI's en el chip 5 y 6

5. Conclusiones

El principal objetivo de este trabajo era estudiar, de forma experimental, y caracterizar, un circuito óptico integrado, fabricado y diseñado por el *Centro Nacional de Microelectrónica* de Barcelona.

A lo largo del trabajo, ha sido relevante tener en cuenta algunos de los conceptos relacionados con el marco teórico de estos dispositivos. De esta forma, se tenía una amplia perspectiva de los diferentes fenómenos físicos que estaban teniendo lugar a la hora de realizar la parte experimental. Por otro lado, poner en contexto el porqué de este tipo de estudios también es fundamental. Las numerosas aplicaciones y ventajas que tienen los circuitos integrados, son las que justifican la gran relevancia del estudio, las mejoras y las optimizaciones en los diseños y fabricaciones de este tipo de dispositivos.

En este caso, es interesante conocer los resultados del proceso de caracterización ya que, las medidas se están realizando en el espectro visible, a diferencia de la gran mayoría de mediciones, que se realizan en el infrarrojo. Esto es algo que no tiene muchos precedentes, y por tanto, conocer el alcance de estos dispositivos tiene un atractivo especial. Ya en cuanto al proceso de caracterización de este chip, éste ha aportado una serie de informaciones acerca de la validez del diseño y la fabricación del mismo. En concreto, los resultados experimentales permiten concluir que:

1. Las pérdidas que experimenta la luz al propagarse en las guías ópticas integradas en este circuito, se corresponden, aproximadamente, con lo esperado. Es decir, obtener pérdidas, en torno a 3 dB/cm, es algo que cabía esperar, si se compara con resultados previos, obtenidos en estudios similares [2]. Por lo tanto, las estructuras diseñadas, fabricadas e integradas en el chip para este fin (Figura (57)), se puede concluir que son válidas.
2. En cuanto a las pérdidas experimentadas por las secciones curvas y los interferómetros multimodo, no se puede decir lo mismo. Aunque ya ha sido comentado, es preciso recalcar que los resultados, obtenidos a partir de las medidas experimentales en curvas y MMI's, no permiten corroborar lo que se pretendía en un principio. En el caso de las guías curvas, los resultados son mejores que para los MMI's, pero aún así, insuficientes. Es posible ir observando una ligera tendencia a aumentar las pérdidas cuando aumenta el número de curvas (tal y como debería ocurrir), pero los ajustes lineales con los datos experimentales no son buenos, ya que la correlación es muy baja. Para comprobar si se cumple lo esperado, será necesario añadir datos al ajuste. Para ello será necesario incluir más guías que, a su vez, estén formadas por un mayor

número de secciones curvas. En el caso de los interferómetros multimodo, ni siquiera ha sido posible observar la tendencia que siguen las pérdidas en función del número de éstos. Esto permite concluir que el diseño o la fabricación no ha sido del todo satisfactoria. También podría considerarse, como una posible solución, la misma que en el caso anterior; ya que aumentar el número de guías y el número de MMI's en ellas, permitirá, a su vez, aumentar la cantidad de datos y por tanto, la fiabilidad de los ajustes.

3. En general, lo que ha sido posible determinar, tras el proceso de caracterización del chip, es la necesidad de volver a diseñar y fabricar algunas de las estructuras del circuito, buscando, de esta forma, mejorar los resultados.

Referencias

- [1] A. Kayyali. *Application of Photonic Integrated Circuits*; Inside Telecom, International Telecoms Business Magazine. 2022. [Ref]
- [2] M. Lelit, M. Słowikowski, M. Filipiak, M. Juchniewicz, B. Stonio, B. Michalak, K. Pavlov, M. Myśliwiec, P. Wiśniewski, A. Kaźmierczak, K. Anders, S. Stopiński, R. B. Beck, R. Piramidowicz. *Passive Photonic Integrated Circuits Elements Fabricated on a Silicon Nitride Platform*; Materials, 15(4), 1398. 2022. [Ref]
- [3] F. Gardes, A. Shooa, G. De Paoli, I. Skandalos, S. Ilie, T. Rutirawut, W. Talataisong, J. Faneca, V. Vitali, Y. Hou, et al. *A Review of Capabilities and Scope for Hybrid Integration Offered by Silicon-Nitride-Based Photonic Integrated Circuits*; Sensors. 2022. [Ref]
- [4] Blog SEAS. *Reflexión y refracción de la luz en transmisiones de fibra óptica*. (05/06/2023). [Ref]
- [5] A. F. Gavela. *Los Caminos de la Luz en la Optoelectrónica (I): Guías Ópticas Planas de Índice de Salto (Modelo Geométrico)*; Apuntes Asignatura Fotónica, Universidad de Oviedo. Curso 2021-2022
- [6] Vendatu. *Ray diagram showing total internal reflection of light through an optical fiber*. (05/06/2023). [Ref]
- [7] H. Nishihara, M. Haruna, T. Suhara. *Optical Integrated Circuits*; Ed. McGraw-Hill. 1989
- [8] X. J. Wang. *Thermal-induced two dimensional beam distortion in planar waveguide amplifiers*. (05/06/2023). [Ref]
- [9] Fosco. *Symmetric Slab Waveguides*. (07/06/2023). [Ref]
- [10] A. G. Ricciardulli, P. W.M. Blom. *Solution-Processable 2D Materials Applied in Light-Emitting Diodes and Solar Cells*. 2020. (08/06/2023). [Ref]
- [11] S. I. Park, Y. J. Quan. *A review on fabrication processes for electrochromic devices*. 2016. (08/06/2023). [Ref]
- [12] LNF, University of Michigan. *Sputter Deposition*. 2022. (08/06/2023). [Ref]
- [13] H. Katsui, T. Goto. *Multi-dimensional Additive Manufacturing*, pp 75-95. 2020. (08/06/2023). [Ref]

- [14] M. F. Saleh, G. Di Giuseppe. *Modal and Polarization Qubits in Ti:LiNbO₃ Photonic Circuits for a Universal Quantum Logic Gate*. 2010. (12/06/2023). [Ref]
- [15] J.-E. Broquin, S. Honkanen. *Integrated Photonics on Glass: A Review of the Ion-Exchange Technology Achievements*. Appl. Sci. 2021. (12/06/2023). [Ref]
- [16] W. Sun, J.-L. Cao, X.-F. Wang. *Photochromic glasses and He-implanted waveguides*. Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2022. (12/06/2023). [Ref]
- [17] D. Fishman. *What are the differences between epitaxy, CVD and ALD?*. 2018. (12/06/2023). [Ref]
- [18] R.G Hunsperger. *Integrated Optics: Theory and Technology*; Ed. Board, Second Edition. 1985
- [19] X. C. Tong. *Advanced Materials for Integrated Optical Waveguides*; Chapter 2: Characterization Methodologies of Optical Waveguides; Ed. Springer. 2014
- [20] KCIndustrial. *Metricon 2010/M Model Prism Coupler*. (23/06/2023). [Ref]
- [21] Via Lite Communications. *Comparación de pérdida frente a frecuencia para fibra y cable coaxial*. (25/06/2023). [Ref]
- [22] L. Chrostowki, J. Flueckiger, C. Lin, M. Hochberg, J. Pond, J. Klein, J. Ferguson, C. Cone. *Design methodologies for silicon photonic integrated circuits*; Oc. SPIE 8989, Smart Photonic and Optoelectronic Integrated Circuits XVI, 89890G. 2014. [Ref]
- [23] M. U. Khan, Y. Xing, Y. Ye and W. Bogaerts. *Photonic Integrated Circuit Design in a Foundry+Fabless Ecosystem*; IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 25, no. 5, pp. 1-14. 2019. [Ref]
- [24] A. Salvia. *Método de las Diferencia Finitas en el Dominio del Tiempo (FDTD)*; Universidad de la República de Uruguay - Facultad de Ingeniería. 2002. [Ref]
- [25] D. F. G. Gallagher, T. P. Felici. *Eigenmode Expansion Methods for Simulation of Optical Propagation in Photonics- Pros and Cons*; Photon Design, Oxford, UK. 2003. [Ref]
- [26] F. Barnes. *Optical Waveguide Analysis Using Beam Propagation Method*; University of Colorado at Boulder - Micro-Optical Imaging Systems Laboratory. 2006. [Ref]

- [27] Christopher R. Doerr. *Silicon Photonic Integration in Telecommunications*; Acacia Communications, Hazlet, NJ, USA. 2015. [Ref]
- [28] J. Faneca, J. Sabek, C. Domínguez. *Silicon Nitride Platform for Visible Photonic Integrated Circuits: Characterization*; IMB-CNM. 2021
- [29] Figura 64. (29/06/2023) [Ref1] [Ref2] [Ref3]