



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



Máster Universitario
en Tecnologías, Sistemas y
Redes de Comunicaciones

Control de la dispersión cromática en guías ranuradas nanofotónicas

Autor: Sara Mas Gómez

Director 1: José Caraquitená Sales

Director 2: Pablo Sanchis Kilders

Fecha de comienzo: 1/11/2009

Lugar de trabajo: Centro de Tecnología Nanofotónica



Centro de Tecnología Nanofotónica de Valencia

Objetivos

En este trabajo, investigamos las propiedades de la dispersión cromática en guías de silicio ranuradas, o guías *slot*, en una región espectral ancha centrada en $\sim 1.5\mu\text{m}$. Analizaremos la variación del perfil de dispersión en función del factor de ocupación, en inglés *fill factor*, del *slot*, es decir, la relación existente entre la anchura de la ranura y la anchura de las guías considerando geometrías tanto simétricas como asimétricas. Con ello, podremos identificar dos regímenes diferentes de dispersión. Además, nuestro análisis muestra que las longitudes de onda de dispersión cero y/o máxima dispersión pueden ser desplazadas mediante un control cuidadoso de los parámetros geométricos de la guía incluyendo el área transversal, el *fill factor* y el grado de asimetría del *slot*. Por último, presentaremos resultados numéricos de simulaciones sobre guías ranuradas de silicio con el objetivo de realizar un control de la dispersión cromática para obtener perfiles planos de dispersión sobre una región espectral ancha. Se mostrará que mediante la optimización de los parámetros estructurales de la guía, en particular, el área transversal y el *fill factor* de la ranura, se pueden conseguir comportamientos planos de dispersión cromática.

Metodología

En la realización de este trabajo, en primer lugar presentaremos los principales conceptos teóricos de la fotónica en silicio, dispersión cromática y guías ranuradas. Posteriormente, nos centraremos en la técnica del control de la dispersión donde variaremos el valor de los diferentes parámetros geométricos de la guía nanofotónica con el fin de obtener los perfiles deseados. Dichos perfiles se obtendrán mediante un software de simulación. Finalmente, analizaremos los resultados obtenidos y presentaremos las conclusiones y líneas futuras que surgen de este trabajo.

Desarrollos teóricos realizados

En primer lugar, se ha utilizado un software de simulación para obtener el índice efectivo $n_{\text{eff}}(\lambda)$ que presenta la estructura nanofotónica en un rango espectral ancho centrado en $1.5\mu\text{m}$. Posteriormente, y mediante un programa desarrollado en Matlab, se calcula mediante derivación numérica el parámetro GVD, del inglés *group delay dispersion*, en función de la longitud de onda para, finalmente, representarlo y analizarlo.

Desarrollo de prototipos y trabajo de laboratorio

Dado que se trata de un estudio teórico, este trabajo se centra en los resultados numéricos obtenidos mediante un software de simulación, dejando la parte de implementación práctica, fabricación y caracterización para líneas futuras.

Resultados

Nuestro estudio muestra que, en general, el comportamiento dispersivo de las guías ranuradas depende fuertemente de las dimensiones y la ubicación del *slot*. Hemos diferenciado cualitativamente dos regímenes de dispersión analizando y comparando varios ejemplos de guías con diferentes áreas transversales y *fill factors*. Nuestros resultados muestran que un control cuidadoso de los parámetros geométricos del *slot*, por ejemplo su anchura y posición, permite la sintonización de las características de la GVD, incluyendo longitudes de onda con cero GVD y/o máxima GVD. Una vez diseñadas y optimizadas las estructuras nanofotónicas bajo estudio, proponemos diferentes diseños de una guía *slot* que presenta un perfil de

dispersión plana en un rango de longitudes de onda de 200nm. Desde otro punto de vista, también se ha analizado el efecto que provoca la variación del *fill factor* de una estructura de área transversal mayor sobre el perfil de GVD, obteniéndose perfiles planos con valores de GVD cercanos a cero.

Líneas futuras

En primer lugar, deberíamos fabricar y verificar experimentalmente los resultados obtenidos y comprobar que efectivamente los diseños realizados presentan los perfiles de dispersión plana que se muestran. Además, introduciendo estructuras más complejas como pueden ser múltiples ranuras, contamos con más grados de libertad a la hora de diseñar y controlar la dispersión cromática, con lo que se podría realizar una sintonización más precisa de los valores de GVD. Por otra parte, y con respecto al diseño de sistemas de comunicaciones ópticas, un aspecto muy importante de estas son los efectos no lineales. Mediante el control de la dispersión cromática se puede provocar que los efectos no lineales en la guía sean incrementados, disminuidos o incluso anulados, dependiendo de lo que requiera la aplicación.

Publicaciones

Durante la realización de este proyecto fin de máster se ha presentado y aceptado una publicación en revista internacional así como tres aportaciones a congresos:

- S. Mas, J. Caraquitena, J.V. Galán, P. Sanchis, J. Martí, *Tailoring the dispersion behavior of silicon nanophotonic slot waveguides*, Optics Express, 18, 20, 20839-20844 (2010).
- S. Mas, J. Caraquitena, J.V. Galán, P. Sanchis, J. Martí, *Tailored chromatic dispersion in silicon-on-insulator slot waveguides*, European Conference on Integrated Optics 2010.
- S. Mas, J. Caraquitena, J.V. Galán, P. Sanchis, J. Martí, *Analysis of chromatic dispersion in symmetric and asymmetric silicon slot waveguides*, Conferencia Española de Nanofotónica 2010.
- S. Mas, J. Caraquitena, J.V. Galán, P. Sanchis, J. Martí, *Dispersion flattening in slot-assisted silicon nanowires*, IEEE Photonics Society 23rd Annual Meeting, 2010.

Abstract

We investigate the chromatic dispersion properties of silicon channel *slot* waveguides in a broad spectral region centered at $\sim 1.5 \mu\text{m}$. The variation of the dispersion profile as a function of the *slot* fill factor, i.e., the ratio between the *slot* and waveguide widths, is analyzed. Symmetric as well as asymmetric geometries are considered. In general, two different dispersion regimes are identified. Furthermore, our analysis shows that the zero and/or the peak dispersion wavelengths can be tailored by a careful control of the geometrical waveguide parameters including the cross-sectional area, the *slot* fill factor, and the *slot* asymmetry degree. We also present numerical simulation results on conventional silicon-on-insulator *slot* waveguides exhibiting dispersion flattened profiles over a broad spectral region. We show that by optimizing the structural waveguide parameters, in particular, the cross-sectional area and the *slot* fill factor, flattened chromatic dispersion behavior can be achieved over a broad spectral region.

Autor: Mas Gómez, Sara, email: smasg@ntc.upv.es

Director 1: Caraquitena Sales, José, email: jcaraqui@ntc.upv.es

Director 2: Sanchis Kilders, Pablo, email: pabsanki@ntc.upv.es

Fecha de entrega: 24-11-10

ÍNDICE

I. Introducción.....	4
II. Fotónica en silicio	6
II.1. Introducción	6
II.2. Tecnología SOI	6
II.3. Propagación en medios homogéneos	8
III. Dispersión Cromática.....	11
III.1. Introducción	11
III.2. Dispersión de la velocidad de grupo	11
III.3. Dispersión de orden superior	14
IV. Control de la Dispersión en guías ranuradas	16
IV.1. Introducción.....	16
IV.2. Guía nanofotónica ranurada.....	16
IV.3. Control de la dispersión	20
IV.4. Resultados obtenidos	21
IV.4.1. Guía ranurada simétrica.....	23
IV.4.2. Guía ranurada asimétrica.....	24
V. Diseño de guías ranuradas con dispersión plana.....	27
V.1. Introducción	27
V.2. Dispersión plana.....	27
V.3. Resultados obtenidos	29
VI. Conclusiones.....	32
VII. Líneas futuras	33
Agradecimientos	34
Bibliografía	34

I. Introducción

La dispersión cromática es un fenómeno universal que tiene lugar, en general, en la propagación de las ondas electromagnéticas en medios y/o elementos dispersivos.

Los medios guiados, tales como las fibras ópticas convencionales, también presentan dispersión cromática. En este caso, uno de los efectos más característicos asociados a la dispersión es el ensanchamiento y distorsión temporal de un pulso de luz en su propagación a lo largo de la fibra [1], véase Fig. 1. Debido a la dispersión, la velocidad de fase de cada componente espectral del pulso es diferente. Así, el retardo relativo entre las distintas componentes del paquete de ondas provoca la distorsión del pulso de luz en su propagación a lo largo de la fibra óptica. La dispersión juega un papel muy importante en varios ámbitos de la fotónica y produce, a menudo, efectos indeseados, como por ejemplo, la limitación de la capacidad de transmisión de datos en sistemas de comunicaciones por fibra óptica [2]. Asimismo, los efectos no lineales que se producen en la interacción de la radiación con la materia están afectados, en gran medida, por la dispersión que presenta el medio material en cuestión [3].

Con el fin de reducir o contrarrestar estos efectos negativos, en las últimas décadas, se han desarrollado fibras ópticas especiales y otros componentes fotónicos que presentan comportamientos dispersivos no convencionales [2]. En esta dirección, la capacidad de diseñar dispositivos fotónicos con propiedades dispersivas “a la carta” es sumamente interesante.



Fig. 1. Ensanchamiento y distorsión de un pulso de luz tras su propagación en una fibra óptica dispersiva

La dispersión total que presenta un medio guiado arbitrario puede desglosarse en varias contribuciones de distinta naturaleza física. En particular, la dispersión cromática está constituida por la dispersión del material y por la dispersión de la guía o dispersión geométrica [3]. La dispersión del material proviene de la dependencia explícita del índice de refracción de los materiales que constituyen la guía con la longitud de onda. Este tipo de dispersión es difícilmente controlable. Por otra parte, la dispersión de la guía está causada por la geometría particular de la guía que define el perfil espacial del índice de refracción en la estructura. Este tipo de dispersión puede ser controlado mediante un diseño cuidadoso de la geometría y dimensiones de la guía y, además, puede contrarrestar la dispersión del material.

Las primeras investigaciones llevadas a cabo en relación a la dispersión cromática en estructuras nanofotónicas en silicio son bastante recientes [4] [5] [6] [7]. En particular, en el año 2002, Tsang

et al. midieron, por primera vez, la dispersión cromática de una guía de silicio de $6\mu\text{m}^2$ de sección transversal en torno a la longitud de onda $1.5\mu\text{m}$ [4]. Más recientemente, los grupos liderados por Lipson y Gaeta [7] y por Vlasov [6], han efectuado análisis más detallados sobre la dispersión cromática en guías de silicio nanométricas con sección transversal rectangular. En particular, Turner *et al.* [7] analizaron la influencia que tienen las dimensiones y relación base-altura de una guía tipo canal sobre la dispersión que presenta la misma. Para guías grandes, con áreas de sección transversal mayores de $\sim 0.5\mu\text{m}^2$, el comportamiento dispersivo de la estructura está gobernado, principalmente, por la dispersión del material, en este caso silicio. A medida que se reducen las dimensiones de la guía, la dispersión geométrica juega un papel cada vez más importante en el comportamiento dispersivo global de la guía. En este régimen, y debido a la reducida dimensión transversal, la dispersión es fuertemente dependiente de la geometría y dimensión exactas de la estructura. Así, mediante el diseño de estructuras de dimensiones nanométricas es posible controlar tanto la magnitud como el signo de la dispersión e incluso sintonizar el valor de la longitud de onda para la cual la dispersión se anula.

Por otra parte, en el año 2004, Lipson y colaboradores propusieron y demostraron un nuevo tipo de guía sobre silicio denominada guía ranurada o guía *slot* [8] [9]. Esta guía es similar a la configuración convencional sólo que presenta una ranura o canal, de diferente material, en la parte central de la guía. Análisis recientes han demostrando que la inclusión del *slot* en la guía modifica notablemente el comportamiento dispersivo de la misma [10]. El análisis realizado por Zheng *et al.*, no obstante, no aborda la posibilidad de cancelar o invertir el signo de la dispersión en determinados rangos o valores de longitud de onda al incorporar la ranura en la guía. Por otra parte, tampoco considera el caso de guías ranuradas asimétricas, esto es, cuando la posición del *slot* no coincide con el centro geométrico de la guía [11].

Actualmente, otra línea de investigación abierta es la que busca perfiles dispersivos planos sobre estructuras nanofotónicas. En concreto, y a partir de guías ranuradas de las mencionadas anteriormente, Zhang ha propuesto recientemente guías híbridas *strip/slot* donde el *slot* está compuesto de nanocristales de silicio y *chalcogenide glass* (As_2S_3) [12] [13]. Una característica crítica de este tipo de guías ranuradas es que producen una transición del modo, desde modo *strip* a modo *slot*, con lo que se consigue dispersión plana introduciendo una dispersión geométrica adicional de banda ancha y ligeramente negativa, a fin de compensar el perfil de dispersión convexo existente.

II. Fotónica en silicio

Debido al rápido avance de la tecnología de la información y las comunicaciones, cada vez se hace más necesario desarrollar dispositivos que permitan obtener mayor velocidad y capacidad de procesamiento de datos. En este contexto, la tecnología fotónica ofrece un gran ancho de banda y reducido consumo energético en contraposición con la tecnología electrónica. Gran parte de los componentes ópticos empleados en la actualidad están constituidos por materiales semiconductores de los grupos III-V de la tabla periódica. Estas alternativas suelen implicar un elevado coste y dificultan la integración por lo que el ensamblado y empaquetado es complejo y delicado.

II.1. Introducción

El satisfactorio resultado del silicio como semiconductor para la microelectrónica ha despertado un gran interés con vista a su uso en aplicaciones orientadas a las comunicaciones ópticas y procesado óptico de señal. Las principales ventajas que ofrece la utilización de dispositivos ópticos basados en silicio son:

- Drástica reducción de costes mediante el uso de una tecnología muy bien conocida y desarrollada.
- Disminución de las dimensiones de los sistemas gracias a la alta integración de diferentes componentes opto-electrónicos en un mismo sustrato.
- Compatibilidad 100% con los procesos de fabricación CMOS utilizados en la industria microelectrónica.

Esta última es la principal ventaja que presenta el uso del silicio ya que de esta forma se pueden fabricar dispositivos fotónicos de silicio a gran escala con un bajo coste y con el añadido de que se pueden integrar junto a dispositivos electrónicos combinando funcionalidades.

II.2. Tecnología SOI

El silicio es un material dieléctrico que se caracteriza principalmente por tener un elevado índice de refracción ($n=3.45$ a la longitud de onda de $1.5\mu\text{m}$) y un coeficiente de absorción despreciable en el rango de longitudes de onda entre $1.1\mu\text{m}$ y $7\mu\text{m}$, por lo que es muy apropiado para los sistemas de comunicaciones ópticas en segunda y tercera ventana. El uso del silicio como material fotónico presenta, no obstante, algunas desventajas como son las altas pérdidas de propagación (debidas principalmente a la rugosidad de las paredes de las estructuras), el bajo coeficiente electro-óptico, la baja eficiencia de emisión de luz y unas elevadas pérdidas de acople a fibra óptica [14]. Sin embargo, el reciente progreso en las técnicas de nanofabricación ha permitido crear un gran número de componentes fotónicos de altas prestaciones basados en silicio, superando con éxito las limitaciones iniciales del silicio como componente fotónico.

Una de las plataformas basadas en silicio más desarrollada es la denominada tecnología SOI (*Silicon on Insulator*), bien establecida en la industria microelectrónica. Esta tecnología aprovecha el elevado índice de refracción del silicio y el bajo índice de refracción del óxido de silicio o sílice ($n=1.45$) para introducir un alto contraste de índices y favorecer así la propagación de la luz y la alta densidad de integración. Además, las obleas tipo SOI son muy baratas y tienen una calidad cristalina excelente. Todo ello ha acelerado el desarrollo de la fotónica en silicio en los últimos años.

Una oblea SOI típica se compone de una delgada capa de silicio (con un espesor aproximado de 200-250nm) depositada sobre una capa de óxido de silicio (SiO_2) de aproximadamente 1-3 μm de espesor y cuya principal función es aislar. Esta capa se encuentra, a su vez, depositada sobre una capa de sustrato de mayor grosor (en torno a 700 μm) también de silicio que aporta resistencia a la estructura (Fig. 2). No obstante, en el mercado podemos encontrar obleas SOI de una gran variedad de espesores y dimensiones dependiendo del fabricante.

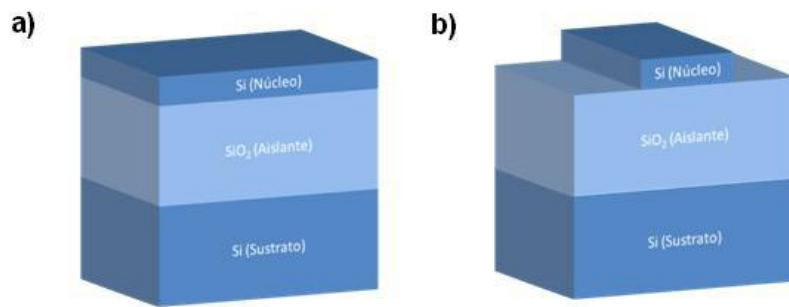


Fig. 2. a) Detalle de las capas que forman una oblea SOI. b) Guía de silicio fabricada sobre una oblea SOI

Uno de los principales retos de esta tecnología ha sido la fabricación de guías ópticas con bajas pérdidas de propagación. Las guías se usan para dirigir la luz desde un lado del chip a otro y para interconectar los dispositivos ópticos entre sí de manera eficiente. Además, una guía proporciona el interfaz con la fibra óptica de todo circuito integrado óptico. No obstante, el alto confinamiento del haz implica una mayor intensidad de campo en las paredes de las guías y, consecuentemente, unas elevadas pérdidas de propagación. El gran reto, ya superado, ha sido el de minimizar la rugosidad en las paredes de las guías y, consecuentemente, las pérdidas de propagación.

Así, mediante la tecnología SOI ha sido posible la fabricación de guías y otros dispositivos ópticos integrados de bajas pérdidas, tanto de propagación como de curvatura. El alto contraste característico de la tecnología SOI proporciona un gran confinamiento de la luz en el núcleo y permite el diseño de circuitos ópticos de alta densidad de integración extremadamente compactos con dimensiones del orden del nanómetro. Una característica importante es que para potencias de entrada estándar (1mW) la eficiencia de confinamiento del modo permite un aumento en la

respuesta no lineal, lo cual proporciona también una plataforma apta para dispositivos no lineales todo ópticos [6]. Por otro lado, el alto contraste genera dispersión en la guía, que contribuye a la dispersión total de la estructura. Así pues, el diseño de dispositivos ópticos requiere un conocimiento preciso de sus propiedades de dispersión.

II.3. Propagación en medios homogéneos

Los campos eléctrico y magnético de una onda electromagnética son siempre ortogonales entre sí, y ambos son ortogonales a la dirección de propagación de la onda. Así pues, los campos eléctrico y magnético en el interior de una guía están relacionados entre sí y esa relación viene dada por las ecuaciones de Maxwell. En general, las funciones que describen los campos eléctrico y magnético son funciones complicadas tanto en tiempo como en espacio. Sin embargo, como las ecuaciones de Maxwell son lineales, la dependencia temporal se puede separar de la dependencia espacial sustituyendo dichos campos por un conjunto de modos armónicos y tomando, posteriormente, la parte real con tal de obtener finalmente los campos físicos. Los modos armónicos de ambos campos eléctrico y magnético se pueden escribir como:

$$\vec{H}(r,t) = \vec{H}(r)e^{j\omega t} \quad (1)$$

$$\vec{E}(r,t) = \vec{E}(r)e^{j\omega t} \quad (2)$$

donde ω es la frecuencia angular. Las ecuaciones de onda derivadas de las ecuaciones de Maxwell para los modos armónicos tienen la forma:

$$\nabla^2 \vec{E}(r) = \varepsilon(r) \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \vec{E}(r) \quad (3)$$

$$\nabla^2 \vec{H}(r) = \varepsilon(r) \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \vec{H}(r) \quad (4)$$

En medios homogéneos, la constante dieléctrica relativa toma un valor constante. De esta manera las ecuaciones de onda derivadas de las ecuaciones de Maxwell para los modos armónicos se pueden simplificar de la siguiente forma [15]:

$$\nabla^2 \vec{E}(r) + k^2 \vec{E}(r) = 0 \quad (5)$$

$$\nabla^2 \vec{H}(r) + k^2 \vec{H}(r) = 0 \quad (6)$$

donde k es el número de onda y se relaciona con ω de manera lineal según la siguiente expresión:

$$k = n \frac{\omega}{c} \quad (7)$$

con n el índice de refracción (que es igual a la raíz cuadrada de la constante dieléctrica relativa, ϵ) y c la velocidad de la luz en el vacío. La ecuación (7) se denomina relación de dispersión y depende del medio homogéneo en cuestión a través del índice de refracción. Así pues, la longitud de onda de una onda que se propaga a través de un medio depende de la longitud de onda en espacio libre a través de la siguiente expresión

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (8)$$

La solución general de las ecuaciones de onda simplificadas para los modos armónicos dadas por (5) y (6) es un conjunto de ondas planas cuya solución más simple para el campo eléctrico viene dada por:

$$\vec{E}(r) = E_0 e^{jkr} \quad (9)$$

donde E_0 es un valor complejo que describe la amplitud y fase de la onda plana, y k es el vector de onda que indica la dirección de propagación de la onda y cuyo módulo es el número de onda.

Cada una de las soluciones de las ecuaciones (5) y (6), como la mostrada de forma general en la ecuación (9), corresponde a cada uno de los modos de propagación del medio en cuestión para cada una de las dos polarizaciones posibles del campo, TE y TM, respectivamente. Las dos características principales de cada uno de los modos son su frecuencia de corte, o frecuencia a partir de la cual dicho modo comienza a excitarse, y su índice de refracción efectivo. Básicamente, el concepto de índice efectivo de un modo está relacionado con el índice de refracción que tendrá dicho modo cuando pase a propagarse por una estructura concreta. Puesto que las estructuras que estamos tratando son estructuras formadas por capas, el índice efectivo de un modo propagándose por la misma estará comprendido necesariamente entre los índices de refracción máximo y mínimo de la estructura por la que se propague.

La constante de propagación de cada uno de los modos (relacionada con el vector de onda k) en una estructura formada por dos capas como puede ser una guía (núcleo y cubierta), se encuentra entre los siguientes valores:

$$k_0 n_1 \geq \beta \geq k_0 n_2 \quad (10)$$

donde n_1 y n_2 son los índices de refracción del núcleo y la cubierta, respectivamente. Para un modo propagándose por una guía a lo largo del eje z , su constante de propagación se puede escribir como:

$$k_z = \beta = n_{eff} k_0 \quad (11)$$

donde k_z corresponde a la constante de propagación del modo en la dirección z y tiene el mismo significado que β para una onda propagándose a lo largo de dicha dirección. Combinando las ecuaciones (10) y (11) llegamos a la siguiente expresión para el índice efectivo:

$$n_1 \geq n_{eff} \geq n_2 \quad (12)$$

Por lo tanto, el índice efectivo de un modo se encuentra siempre comprendido entre los valores de los índices de refracción del núcleo y de la cubierta de la estructura por la que se propaga [15].

III. Dispersión Cromática

III.1. Introducción

La dispersión juega un papel crítico en la propagación de pulsos ópticos cortos ya que las diferentes componentes espectrales asociadas con el pulso viajan a diferentes velocidades dadas por $c/n(\omega)$. Incluso cuando los efectos no lineales son despreciables, la dispersión induce un ensanchamiento del pulso al propagarse en la fibra el cual puede ser perjudicial en los sistemas de comunicaciones ópticas. En el régimen no lineal, la combinación de la dispersión y la no linealidad puede dar lugar a un comportamiento diferente al deseado.

Matemáticamente, los efectos de la dispersión suelen analizarse expandiendo la constante de propagación β del modo en serie de Taylor alrededor de la frecuencia en la cual se centra el espectro del pulso [3]:

$$\beta(\omega) = n(\omega) \frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}(\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (13)$$

donde

$$\beta_m = \left(\frac{d^m \beta}{d\omega^m} \right)_{\omega=\omega_0} \quad (14)$$

con $m=0,1,2,\dots$. Los parámetros β_1 y β_2 se relacionan con el índice de refracción efectivo $n(\omega)$ y con sus derivadas a través de las siguientes expresiones

$$\beta_1 = \frac{1}{v_g} = \frac{n_g}{c} = \frac{1}{c} \left(n + \omega \frac{dn}{d\omega} \right) \quad (15)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{c} \left(2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2 n}{d\omega^2} \right) \quad (16)$$

donde n_g es el índice de grupo y v_g es la velocidad de grupo. El coeficiente β_2 se denomina parámetro de dispersión de la velocidad de grupo GVD, y es el responsable del ensanchamiento del pulso en una aproximación de primer orden.

III.2. Dispersión de la velocidad de grupo

La velocidad de grupo asociada con el modo fundamental es dependiente de la frecuencia debido a la dispersión cromática. Como resultado, diferentes componentes espectrales del pulso viajan a velocidades de grupo ligeramente diferentes [16], como ya hemos mencionado anteriormente. Este fenómeno es conocido con el nombre de *Dispersión de la velocidad de grupo* (GVD) o *Dispersión cromática*. La dispersión cromática tiene dos contribuciones, la dispersión del material y la dispersión de la guía.

La dispersión puede causar errores de bit en las comunicaciones digitales y un mayor nivel de ruido en las comunicaciones analógicas. En particular, puede convertirse en un serio problema en los sistemas de alta tasa de bit si no se emplean técnicas de medida precisas y métodos de compensación de la dispersión. Consideremos por ejemplo una fibra óptica monomodo de longitud L . Una componente espectral específica a frecuencia ω llegará al extremo de salida de la fibra después de un retraso temporal de $T = L/v_g$, donde v_g es la velocidad de grupo, definida como

$$v_g = \left(\frac{d\beta}{d\omega} \right)^{-1} \quad (17)$$

Si utilizamos en esta última expresión $\beta = n \cdot k_0 = n \cdot \omega/c$, podemos hallar entonces $v_g = c/n_g$ donde n_g es el índice de grupo dado por [3]

$$n_g = n + \omega \left(\frac{dn}{d\omega} \right) \quad (18)$$

Así, la dependencia frecuencial de la velocidad de grupo provoca un ensanchamiento del pulso debido a que las diferentes componentes espectrales del pulso se dispersan durante la propagación y no llegan simultáneamente al final de la fibra. Si $\Delta\omega$ es la anchura espectral del pulso, el grado de ensanchamiento del pulso tras propagarse por una fibra de longitud L viene dado por

$$\Delta T = \frac{dT}{d\omega} \Delta\omega = \frac{d}{d\omega} \left(\frac{L}{v_g} \right) \Delta\omega = L \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \Delta\omega = L\beta_2 \Delta\omega \quad (19)$$

En términos de longitud de onda, se tiene que $\omega = 2\pi c/\lambda$ y $\Delta\omega = (-2\pi c/\lambda^2)\Delta\lambda$, por lo que el grado de ensanchamiento del pulso se puede escribir como $\Delta T = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{L}{v_g} \right) \Delta\lambda = DL\Delta\lambda$ donde

$$D = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{v_g} \right) = \frac{-2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (20)$$

siendo D el *parámetro de dispersión*, o parámetro GVD, el cual suele expresarse en ps/km*nm. La dependencia de D con la longitud de onda está gobernada por la dependencia del índice de modo, n , con la frecuencia de la siguiente manera

$$D = \frac{-2\pi c}{\lambda^2} \frac{d}{d\omega} \left(\frac{1}{v_g} \right) = \frac{-2\pi c}{\lambda^2} \left(2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2n}{d\omega^2} \right) \quad (21)$$

A menudo, el parámetro de dispersión puede expresarse como $D = D_M + D_W$ donde las dos contribuciones vienen dadas por la *dispersión del material* D_M y la *dispersión de la guía* D_W .

La dispersión del material se debe a que el índice de refracción del silicio y de la sílice, los materiales empleados para la fabricación de fibras y guías de onda, varían con la frecuencia óptica ω . En un nivel básico, el origen de la dispersión del material está relacionado con las frecuencias de resonancia características en las cuales el material absorbe la radiación electromagnética. Lejos de las resonancias medias, el índice de refracción $n(\omega)$ se aproxima por la denominada *ecuación de Sellmeier*:

$$n^2(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^M \frac{A_j \cdot \omega_j^2}{\omega_j^2 - B_j^2} \quad (22)$$

donde ω_j es la frecuencia de resonancia y A_j, B_j son los coeficientes de Sellmeier. Los valores de dichos coeficientes tanto para el silicio como para la sílice se muestran en la Tabla 1 [17]:

Coeficiente	Silicio (Si)	Sílice (SiO ₂)
A ₁	10.6684293	0.663472443
A ₂	0.00304347484	0.440647918
A ₃	1.54133408	0.899007061
B ₁	0.301516485	0.0665176613
B ₂	1.134755115	0.115015076
B ₃	1104	9.90316809

Tabla 1. Coeficientes de Sellmeier para el Silicio y la Sílice [17]

La dispersión del material está relacionada con la pendiente del índice de grupo a través de la relación $D_M = c^{-1}(dn_g/d\lambda)$. La longitud de onda particular donde se cumple $dn_g/d\lambda = 0$ se denomina *longitud de onda de dispersión cero* λ_{ZD} , ya que $D_M=0$ cuando $\lambda=\lambda_{ZD}$. Para longitudes de onda tales que $D < 0$ se dice que tenemos dispersión normal, es decir, $\beta_2 > 0$. En el régimen de dispersión normal, las componentes de alta frecuencia del pulso óptico viajan más despacio que las componentes de baja frecuencia. Por el contrario, para longitudes de onda tales que $D > 0$, tendremos un régimen de dispersión anómala en el cual $\beta_2 < 0$.

La dispersión de la guía depende de la geometría y dimensiones de la estructura considerada. Para poder comprender esta componente de la dispersión hay que recordar que la potencia de un modo se propaga parcialmente por el núcleo y parcialmente por el revestimiento. El índice efectivo de un modo se sitúa entre el índice de refracción del núcleo y del revestimiento, acercándose más a

uno u otro dependiendo de cuál sea el porcentaje de la potencia que se propaga por ellos. Como la distribución de potencia de un modo entre el núcleo y el revestimiento depende de la longitud de onda, si la longitud de onda cambia, la distribución de potencia también cambia, provocando un cambio en el índice efectivo o constante de propagación del modo. Por lo tanto, aún en ausencia de dispersión del material, si la longitud de onda varía, seguiría produciéndose el fenómeno de la dispersión debido a la dispersión por guiado de onda o dispersión geométrica.

La dispersión cromática total es el resultado de combinar dos efectos diferentes: la dispersión del material y la dispersión geométrica. La dispersión del material y la dispersión geométrica tienen, a menudo, efectos opuestos. La Fig. 3 muestra la dispersión de la guía y la dispersión del material para una fibra óptica monomodo convencional, así como la dispersión cromática total [2]. Debemos tener en cuenta que el definir la dispersión total como la suma de la dispersión del material y la dispersión de la geometría es una aproximación comúnmente utilizada, pero que, sin embargo, dependiendo de la longitud de onda en la que estemos trabajando, esta aproximación será más o menos fiable. Los fabricantes de fibra pueden aprovechar estos efectos para cambiar la situación y obtener curvas suaves de dispersión cromática.

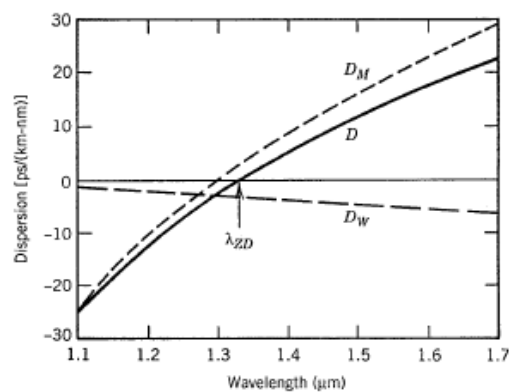


Fig. 3. Dispersión total D y sus contribuciones relativas D_M y D_W para una fibra convencional monomodo [2]

III.3. Dispersión de orden superior

Un último aspecto a tener en cuenta es que, cuando operamos en la longitud de onda de dispersión cero, $\lambda = \lambda_{ZD}$, se cumple que $D=0$. Sin embargo, los efectos dispersivos no desaparecen completamente. Los pulsos ópticos experimentan ensanchamiento debido a efectos dispersivos de órdenes mayores. Esta característica puede entenderse teniendo en cuenta que D no puede hacerse cero en todas las longitudes de onda contenidas en el espectro del pulso centrado en λ_{ZD} . Evidentemente, la dependencia de D con la longitud de onda entra en juego en el ensanchamiento del pulso.

Aunque la contribución de β_2 sea la dominante en la mayoría de los casos de interés práctico, a veces es necesario incluir también la *dispersión de tercer orden*, gobernada por el término β_3 . Por ejemplo, si la longitud de onda del pulso coincide aproximadamente con la longitud de onda de dispersión cero y $\beta_2 \approx 0$, entonces el término β_3 proporciona la contribución dominante a los efectos de la GVD. Para pulsos ultracortos (con anchura $T_0 < 1ps$), es necesario incluir el término de tercer orden, incluso cuando $\beta_2 \neq 0$, debido a que en este caso se deben considerar más términos en la expansión en serie de Taylor.

Los efectos dispersivos de mayor orden están gobernados por la *pendiente de dispersión* $S = dD/d\lambda$. A este parámetro S también se le conoce con el nombre de *parámetro de dispersión diferencial*. La pendiente de dispersión puede ser escrita como

$$S = \left(2\pi c / \lambda^2\right)^2 + \left(4\pi c / \lambda^3\right)\beta_3 \quad (23)$$

donde $\beta_3 = d\beta_2/d\omega \equiv d^3\beta/d\omega^3$ es el parámetro de dispersión de tercer orden. En la longitud de onda $\lambda = \lambda_{ZD}$, tenemos $\beta_2 = 0$, y S es proporcional a β_3 [3].

IV. Control de la Dispersión en guías ranuradas

IV.1. Introducción

Las guías de ranura tienen unas propiedades muy interesantes para poder realizar un gran abanico de dispositivos completamente ópticos (sensores, conmutadores, filtros, etc.). Este tipo de guías es compatible con los sistemas de fabricación actuales [9] y además permiten una alta integración gracias a que utilizan alto contraste de índices. No obstante, al contrario que en las guías de alto contraste tradicionales, en la guía ranurada la mayor parte de la potencia óptica se concentra en la zona de bajo índice [18]. Su principal ventaja radica en que se concentra una elevada potencia en una zona muy pequeña, por lo que cualquier cambio en los materiales que se introduzcan en la zona de la ranura afecta enormemente en el comportamiento de la estructura. Esta propiedad es muy interesante para aplicaciones de sensores y también en cualquier dispositivo que requiera materiales no lineales o materiales activos [19] [20] [21].

Aunque se trata de una propuesta reciente, son muchas las aplicaciones que se han desarrollado basadas en este nuevo tipo de guía. Así, las guías de ranura se pueden utilizar en componentes activos como conmutadores [20], moduladores [21], puertas lógicas [22] o rotadores de polarización [23].

IV.2. Guía nanofotónica ranurada

Guiar la luz en materiales de bajo índice tales como el aire es complejo mediante guías convencionales basadas en el fenómeno de reflexión total interna. Por el contrario, pueden emplearse las reflexiones externas de múltiples capas dieléctricas o cristales fotónicos. Sin embargo, estas estructuras son sensibles a la longitud de onda y deben tener grandes dimensiones para lograr altas reflexiones. Recientemente, se ha demostrado que el campo óptico puede ser guiado y confinado en un material de bajo índice de refracción, incluso cuando la luz se guía mediante el fenómeno de reflexión total interna, si se emplea una estructura de bajo índice de refracción y área transversal nanométrica embebida en un medio de alto índice.

Una guía óptica ranurada, también denominada *slot-waveguide* [8] [24], ha sido recientemente propuesta como una nueva estructura de guiado que confina y guía la luz en un material de bajo índice de refracción. Una guía de ranura consta de dos raíles de un material de alto índice separados por una región de bajo índice (*slot*) de tamaño nanométrico. En esta configuración, el campo eléctrico exhibe una discontinuidad en la interfaz que separa los dos materiales de distinto índice lo cual provoca que se logre una alta intensidad óptica en la región de bajo índice. En la Fig. 4 se representa una estructura típica de guía ranurada. La guía está formada por un *slot* de índice bajo (n_S) situado entre dos regiones rectangulares de alto índice (n_H), ambas envueltas por una cubierta de índice bajo (n_C). Nuestro estudio se centrará en estructuras en las cuales la cubierta posee el mismo índice de refracción que la zona del *slot*, es decir, $n_S=n_C$.

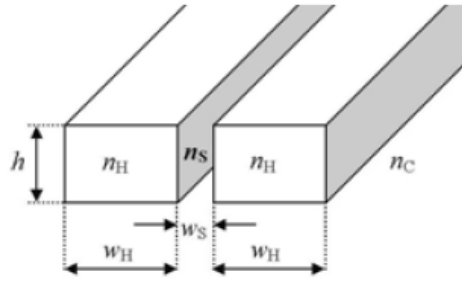


Fig. 4. Estructura general de una guía ranurada nanofotónica [8]

El principio de operación de esta guía se basa en la discontinuidad de la componente normal del campo eléctrico en la interfaz de alto contraste de índice. La componente mayor del campo eléctrico del modo quasi-TE (E_x) es perpendicular a las paredes de la ranura sufriendo, por tanto, una fuerte discontinuidad en dicha región [8], véase Fig. 5.

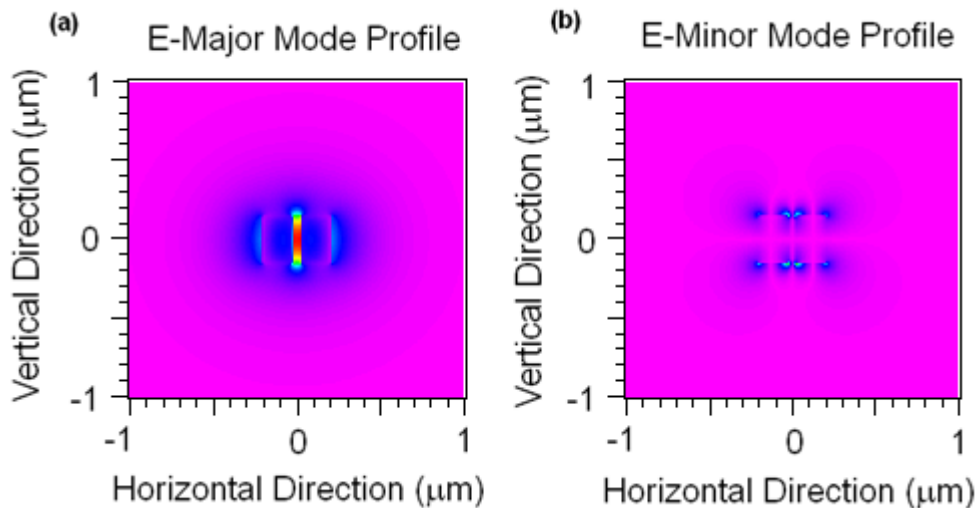


Fig. 5. Componentes (a) mayor y (b) menor del perfil de campo para el modo fundamental

Cuando las dimensiones de la guía ranurada son mucho más pequeñas que la longitud de decaimiento del campo desde la interfaz a la región de índice bajo, el campo eléctrico permanece alto dentro de la región central. El campo magnético es continuo en las paredes del *slot*. Con todo, la intensidad óptica dentro del *slot* es mucho mayor que la que se encuentra en las regiones de alto índice. La potencia transmitida en un *slot* de bajo índice de anchura menor de 100nm puede ser mayor que el 40% de la potencia total cuando el *slot* está diseñado de manera óptima. Para el modo quasi-TM, con la componente mayor del campo eléctrico paralela a las paredes del *slot*, los efectos de la presencia del *slot* son mínimos.

En ausencia de *slot* en la estructura, el índice efectivo del modo quasi-TE es mucho más alto que el del modo quasi-TM, lo que indica que la potencia del modo quasi-TE se confina en mayor medida en el núcleo. Cuando se introduce la región *slot*, se produce un fuerte decrecimiento en el índice efectivo del modo quasi-TE, mientras que el índice efectivo del modo quasi-TM sólo se ve afectado ligeramente. Este comportamiento es coherente con lo expuesto anteriormente, esto es, para el modo quasi-TE la luz está concentrada en la región de índice bajo debido a la discontinuidad del campo.

Básicamente, se han investigado dos configuraciones diferentes de guía ranurada: horizontal y vertical, tal y como se muestra en las Fig. 6 y 7, respectivamente [25].

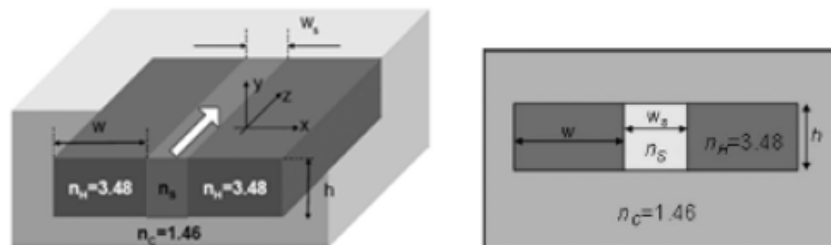


Fig. 6. Configuración vertical de la guía *slot*. (a) Estructura (b) y Corte transversal [25]

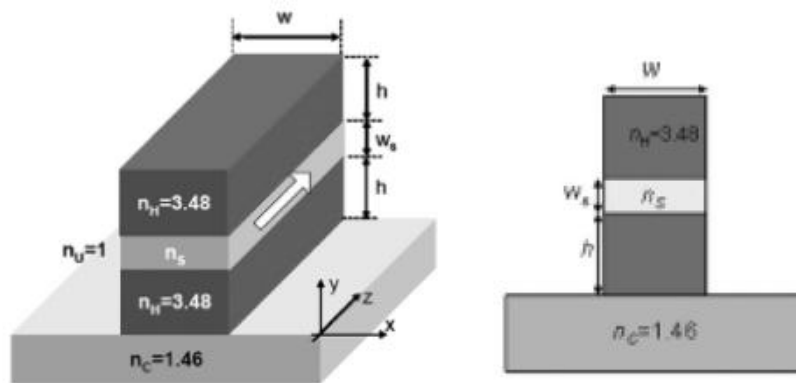


Fig. 7. Configuración horizontal de la guía *slot*. (a) Estructura (b) y Corte transversal [25]

▪ Configuración vertical:

La guía ranurada vertical está formada por dos guías adyacentes de alto índice de silicio separadas por la región *slot*. El medio entre las dos guías de silicio tiene el mismo índice de refracción que el medio que rodea a la guía completa. En esta configuración el mayor confinamiento de campo se consigue para la polarización TE.

El diseño de este tipo de estructuras se basa en encontrar guías con dimensiones apropiadas para obtener un determinado perfil de dispersión y/o un determinado valor de área efectiva. Esta última

debe ser minimizada para maximizar los efectos no lineales para una potencia de entrada dada. El campo está mucho más confinado en la región *slot* cuando el área efectiva es mínima. Los parámetros de diseño son la anchura ω_s , el grosor h y la anchura de las guías de silicio adyacentes ω [25]. Cuando la guía se estrecha, el índice efectivo aumenta, mientras que el área efectiva disminuye. El área efectiva también se hace más pequeña cuando la guía es más delgada. El índice efectivo es mayor cuando la guía *slot* es más delgada debido al mayor tamaño del alto índice de las guías de silicio.

La implementación de la guía ranurada se degrada cuando las paredes de las dos guías de silicio adyacentes no son perfectamente verticales. Una de las principales desventajas es que el área efectiva aumenta ya que el modo guiado está menos confinado en la región *slot*. Este incremento del área efectiva restringe la mejora del efecto no lineal originado en el material contenido en la guía ranurada.

▪ Configuración horizontal:

En este caso, la guía ranurada está formada por dos guías adyacentes de alto índice de silicio colocadas encima y debajo de la región *slot*. El *slot* está situado encima de una capa de silicio mientras que el medio que lo rodea es aire. En esta configuración el mayor confinamiento de campo se consigue para la polarización TM [25].

Tanto las expresiones como los parámetros a diseñar son los mismos que en el caso de la configuración vertical, es decir, la anchura del *slot* waveguide, el grosor de la región *slot* y el grosor de las guías de silicio ω , ω_s y h respectivamente.

El índice efectivo disminuye cuando la anchura de las guías de silicio disminuye. Cuando la anchura de las guías de silicio aumenta, la cantidad de campo en las guías de silicio superior e inferior también aumenta, incrementando así el área efectiva y el índice efectivo. El campo es más fuerte en la capa de silicio inferior que en el aire que rodea el *slot*, mientras que en este último el campo se hace más fuerte en las guías de silicio superior e inferior. La intensidad de campo es ligeramente superior en la guía de silicio inferior debido a la influencia de la capa de silicio inferior.

Cuando el ángulo en las paredes es mayor, el índice efectivo disminuye, mientras que el área efectiva aumenta. El aumento del área efectiva se acentúa cuando la región *slot* es más delgada. En contraste con la configuración vertical, la influencia del ángulo de las paredes en el confinamiento del campo es mucho menor en la configuración horizontal.

▪ Comparación entre las dos configuraciones:

A la hora de decidir qué configuración se debe emplear en el diseño de una guía óptica de ranura hay que tener en cuenta las principales diferencias que presentan ambas configuraciones [25]:

- Valores más pequeños del área efectiva se consiguen reduciendo la anchura de la región *slot* en la configuración vertical y el grosor de la región *slot* en la configuración horizontal.

- La influencia en la variación del índice de refracción en la región *slot* en el área efectiva y por lo tanto en la implementación de las no linealidades es ligeramente superior en la configuración horizontal con respecto a la vertical, aunque en ambos casos puede considerarse despreciable.

En este trabajo nos centramos en la configuración vertical para la guía ranurada. Un análisis similar al realizado para esta estructura podría efectuarse considerando la configuración horizontal.

IV.3. Control de la dispersión

En un sistema de comunicaciones por fibra óptica, la información suele transmitirse utilizando una secuencia codificada de pulsos ópticos cuya anchura viene determinada por la tasa de bit B del sistema. La dispersión provoca el ensanchamiento de los pulsos, lo que es indeseable ya que interfiere con los procesos de detección y lleva a errores si el pulso se expande más allá de su ranura de bit correspondiente ($T_B=1/B$). Evidentemente, la GVD limita la tasa de bit para una distancia fija de transmisión L . Además, el problema de la dispersión es importante cuando se emplean amplificadores ópticos para compensar, por ejemplo, las pérdidas de la fibra en un sistema de comunicaciones ópticas [3].

La ingeniería de la dispersión en los sistemas de comunicaciones es un punto crítico para un gran número de aplicaciones. Por ejemplo, los esquemas de compensación de dispersión que minimizan los efectos del ensanchamiento temporal de los pulsos son un componente esencial de los sistemas de telecomunicaciones presentes y futuros. Controlar la dispersión es crucial también para incrementar la eficiencia de numerosos procesos ópticos no lineales tales como la generación de solitones, la compresión de pulso por medio de solitones o el mezclado de cuatro ondas. Como ya ha sido demostrado en fibras ópticas micrométricas, un control cuidadoso del diámetro del núcleo y de la fracción de aire que rellena el recubrimiento permite desplazar la GVD a su región anómala, lo que lleva a una mejora de numerosos procesos ópticos no lineales tales como el mezclado de cuatro ondas, la oscilación paramétrica, la auto-compresión de pulso extrema y la generación de supercontinuo [7].

En el ámbito de la “fotónica en silicio”, la técnica del *control de la dispersión* consiste en diseñar guías SOI para conseguir que éstas tengan, por ejemplo, una dispersión anómala ($\beta_2 < 0$) alrededor de la longitud de onda $1.55\mu\text{m}$. Esto es posible eligiendo apropiadamente los parámetros de diseño de la estructura. Se ha demostrado [5] que la longitud de onda de dispersión cero depende de los parámetros de diseño de la guía (Fig. 8), en este caso de las longitudes W , H y h , y puede ser controlada diseñando la guía adecuadamente.

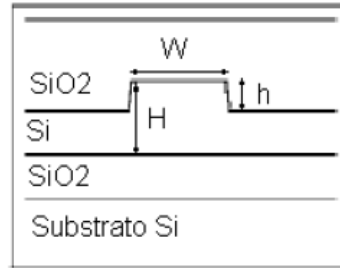


Fig. 8. Parámetros de diseño implicados en el control de la dispersión cromática de una guía tipo SOI [5]

IV.4. Resultados obtenidos

Para calcular la dispersión cromática en función de la longitud de onda, realizamos simulaciones numéricas utilizando un software de simulación basado en el método de propagación de haz, BPM. El método BPM se encuentra implementado por la herramienta de simulación que hemos utilizado en este trabajo, denominada *RSoft Photonics CAD Suite*, versión 5.1.0.2. Dicha herramienta de simulación es muy potente para el diseño y análisis de estructuras ópticas e incorpora una herramienta básica basada en BPM, *BeamPROP*. Utilizando el software, obtenemos el índice efectivo, $n_{\text{eff}}(\lambda)$, en un rango espectral ancho para, posteriormente, calcular mediante derivación numérica el parámetro GVD en función de la longitud de onda,

$D_{\lambda} = -\left(\frac{\lambda}{c_0}\right) \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2}$. Es importante tener en cuenta que nuestro análisis incluye la contribución de

la dispersión del material al parámetro GVD considerando la ecuación de Sellmeier para el silicio y la sílice.

Mediante este método numérico, hemos analizado el comportamiento dispersivo de las guías ranuradas con tres diferentes áreas transversales, $A=hw$, siendo h y w la altura y anchura totales de la guía respectivamente. Además, se ha considerado una relación altura-anchura fija de valor 1:1.5 [26], que denominaremos *aspect ratio*. Las áreas transversales bajo análisis son $1\mu\text{m}^2$, $0.5\mu\text{m}^2$ y $0.1\mu\text{m}^2$ y se consideran diferentes *slot fill factors* en el rango $\{1:5, 1:50\}$, donde el *fill factor* se define como la relación normalizada entre la anchura del *slot* y la anchura de las guías, es decir, t/w .

En la Fig. 9 se muestra una guía tipo canal convencional. Una guía óptica desempeña básicamente dos funciones fundamentales en un circuito óptico integrado. Por un lado, los distintos diseños grabados en el interior del circuito integrado se comunican entre ellos mediante este tipo de estructuras. Por otro lado, y quizá el aspecto más importante, una guía óptica proporciona al circuito integrado su interfaz con el mundo exterior, esto es, con la fibra óptica. Por lo tanto, la caracterización de este tipo de estructuras es fundamental.

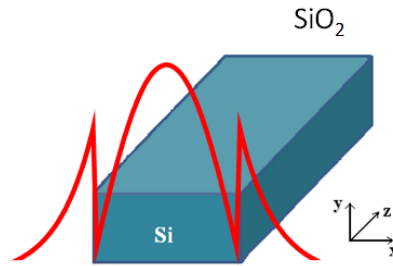


Fig. 9. Guía *canal* convencional con la distribución de campo eléctrico del modo quasi-TE en la dimensión x para $\lambda=1.55\mu\text{m}$ [26]

En la Fig. 10 mostramos los perfiles de GVD resultantes para las tres diferentes áreas transversales bajo análisis de una guía tipo canal convencional SOI. Se ha incluido en dicha figura el perfil de dispersión del silicio cristalino puro para una mejor comparación. Como se puede observar en la figura, en el caso de considerar áreas transversales grandes, el perfil de GVD es similar al correspondiente al del silicio, de tal manera que el parámetro GVD aumenta gradualmente para longitudes de onda mayores. Nombraremos este comportamiento como régimen de dispersión del material. Nótese que se produce un desplazamiento vertical en el perfil de dispersión, con lo que se podría encontrar una longitud de onda de dispersión cero y, por tanto, una región con GVD anómala. Por otra parte, en el caso de áreas transversales pequeñas, el perfil de GVD es significativamente diferente, presentando un máximo de GVD dentro de la región espectral y dos longitudes de onda de dispersión cero cuando el valor de dispersión máximo es positivo, como se muestra en la Fig. 10. Estas características de la GVD describen el régimen de dispersión geométrica. Para otros *aspect ratios* en este régimen de dispersión se obtienen perfiles de dispersión similares, pero encontramos GVD normal en todo el rango espectral. En conclusión, se pueden observar dos tipos de características dispersivas cualitativamente diferentes dependiendo del área transversal de la guía.

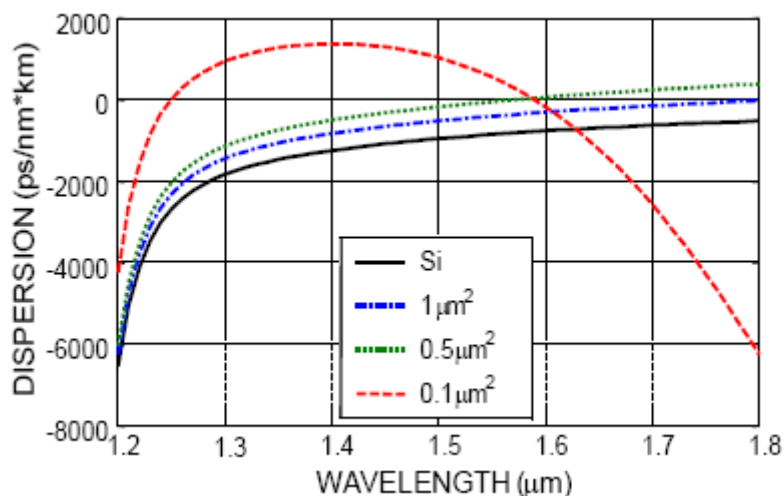


Fig. 10. Perfil de dispersión cromática para el modo fundamental quasi-TE de una guía tipo *canal* con tres áreas transversales diferentes y del silicio cristalino puro [26]

Nuestro análisis demuestra que, dependiendo de los parámetros estructurales específicos, la guía *slot* puede operar en regímenes de dispersión cualitativamente distintos. Además, un control cuidadoso de los parámetros geométricos del *slot*, por ejemplo su anchura y posición, permiten la sintonización de las características de la GVD, incluyendo las longitudes de onda de máxima y/o cero GVD. En dicho estudio se analizan tanto la configuración simétrica como asimétrica de las guías ranuradas, esto es, cuando la posición del *slot* no coincide con el centro geométrico de la estructura [26].

IV.4.1. Guía ranurada simétrica

Consideremos una guía ranurada convencional SOI consistente en dos guías de silicio embebidas en una cubierta de sílice, como se muestra en la Fig. 11. En dicha figura se puede observar a su vez el perfil de campo eléctrico típico del modo fundamental quasi-TE en el eje x . Nótese que la distribución modal presenta una fuerte discontinuidad en las interfaces de alto contraste de índice, y el campo óptico se ve significativamente incrementado en la región de la ranura.

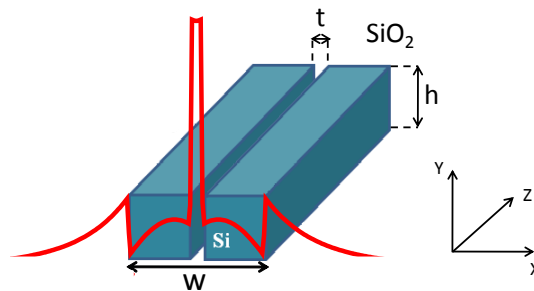


Fig. 11. Guía *slot* simétrica vertical convencional con la distribución de campo eléctrico del modo quasi-TE en la dimensión x para $\lambda=1.55\mu\text{m}$ [26]

Hemos calculado las propiedades dispersivas de tres guías *slot* con las áreas transversales indicadas anteriormente, $1\mu\text{m}^2$, $0.5\mu\text{m}^2$ y $0.1\mu\text{m}^2$, incluyendo la región *slot*. Asumiendo también el mismo *aspect ratio*, las curvas de GVD resultantes se muestran en la Fig. 12 (a-c) respectivamente. Para cada área transversal, se han considerado diferentes *fill factors*, 1:5, 1:10, 1:25 y 1:50. Al igual que ocurría en la guía convencional, los perfiles de GVD pueden agruparse en dos regímenes de dispersión diferentes; cuando disminuye el *fill factor*, los perfiles de GVD convergen asintóticamente a la dispersión de la guía canal convencional [26].

El efecto que produce la inclusión del *slot* es distinto para cada área transversal considerada. Para el área $1\mu\text{m}^2$, Fig. 12(a), un cambio en el valor del *fill factor* se traduce en una variación relativamente pequeña en la curva de GVD. De hecho, todos los perfiles dispersivos pertenecen al régimen de dispersión del material. Nótese que para valores del *fill factor* mayores, el perfil de dispersión presenta una longitud de onda de dispersión cero y, por lo tanto, nos encontramos con una región de dispersión anómala.

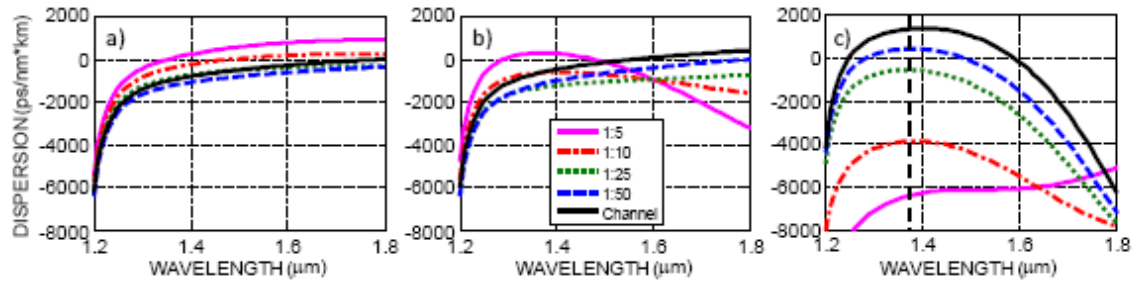


Fig. 12. Perfiles de dispersión cromática de guías *slot* simétricas para diferentes valores de *fill factor*. Se han considerado tres áreas transversales diferentes: (a) $1\mu\text{m}^2$, (b) $0.5\mu\text{m}^2$, y (c) $0.1\mu\text{m}^2$, con un *aspect ratio* fijo de 1:1.5. La curva de dispersión de una guía *canal* convencional también ha sido incluida [26]

Para áreas transversales intermedias, $\sim 0.5\mu\text{m}^2$, Fig. 12(b), encontramos que la dimensión del *slot* determina fuertemente el régimen dispersivo en el que opera la guía. En particular, para valores de *fill factor* de 1:5 y 1:10, tenemos perfiles de GVD en el régimen de dispersión geométrica, mientras que valores de 1:25 y 1:50 presentan curvas GVD bastante similares al perfil de dispersión del material del silicio.

Finalmente, para áreas transversales pequeñas, $0.1\mu\text{m}^2$, Fig. 12(c), encontramos que la guía *slot* trabaja principalmente en el régimen de dispersión geométrica. Nótese que la curva dispersiva se desplaza significativamente hacia abajo cuando se incrementa el valor del *fill factor*, mientras que la longitud de onda de máxima GVD permanece constante en $\sim 1.4\mu\text{m}$ (curva rallada vertical). De acuerdo con el *aspect ratio* elegido, las dimensiones transversales consideradas son $h = 258\text{nm}$ y $w = 387\text{nm}$ [26].

IV.4.2. Guía ranurada asimétrica

En las guías de silicio *slot* asimétricas, la ubicación del *slot* es diferente del centro geométrico de la guía, como se muestra en la Fig. 13. Definiremos el grado de asimetría como $k=2s/w$, donde s es la distancia desde el centro de la guía al centro del *slot*, en valor absoluto, y $w/2$ es la mitad de la anchura total de la guía. Teniendo en cuenta esta definición, las guías *slot* simétricas tienen un grado de asimetría igual a cero.

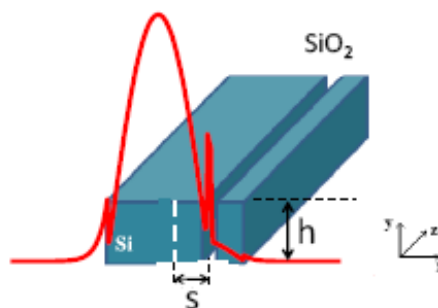


Fig. 13. Guía *slot* asimétrica vertical convencional con la distribución de campo eléctrico del modo quasi-TE en la dimensión x para $\lambda=1.55\mu\text{m}$ [26]

Hemos analizado el perfil de GVD para diferentes grados de asimetría, $k=0, 0.25, 0.5$ y 0.75 mientras mantenemos constante el área transversal. Nuestro objetivo es investigar la influencia de la asimetría que presenta la guía en las propiedades de dispersión cromática para las mismas áreas transversales escogidas anteriormente [26].

En la Fig. 14 mostramos los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas para las tres áreas utilizadas anteriormente (columnas) y tres diferentes valores de *fill factor*, 1:5, 1:10 y 1:25 (filas). Hay que tener en cuenta que, de acuerdo con nuestra definición del grado de asimetría, un desplazamiento específico del *slot* a la derecha o a la izquierda desde el centro geométrico de la estructura conduce al mismo grado de asimetría, con lo que se obtiene el mismo valor de GVD, como se ha verificado con las simulaciones numéricas pertinentes.

En general, hemos obtenido que la GVD es más sensible a los cambios en el grado de asimetría cuando se consideran áreas transversales pequeñas. Para áreas grandes, $1\mu\text{m}^2$, y para todos los *fill factor*, Fig. 14(a)-14(c), la guía siempre opera en el régimen de dispersión del material y, cuando se incrementa el grado de asimetría, solamente se produce una pequeña variación en el perfil de GVD. En el caso de áreas intermedias, $0.5\mu\text{m}^2$, encontramos cambios mucho más significativos en la GVD. Por una parte, en la Fig. 14(d)-14(e), comenzando en el régimen de dispersión geométrica, una variación en el grado de asimetría modifica el perfil de dispersión de tal manera que la longitud de onda de máxima dispersión se desplaza hacia valores mayores. Para grandes grados de asimetría, $k=0.75$, la GVD conmuta desde el régimen de dispersión geométrica al régimen de dispersión del material. Por otra parte, para un valor de *fill factor* más pequeño, 1:25, Fig. 14(f), la GVD en primer lugar cambia del régimen de dispersión del material al geométrico cuando se incrementa el grado de asimetría, retornando al comportamiento original cuando la asimetría aumenta aún más. Finalmente, para áreas transversales pequeñas, $0.1\mu\text{m}^2$, Fig. 14(g)-14(i), encontramos una variación mucho más significativa en la GVD que en los casos anteriores. Nótese la diferente escala en los ejes de dispersión. Para un *fill factor* de 1:5, Fig. 14(g), cuando el grado de asimetría se incrementa, la GVD entra en un nuevo régimen de dispersión en el cual el perfil de dispersión presenta un máximo y un mínimo en la región espectral. Este comportamiento dispersivo es consistente con los perfiles de GVD obtenidos para guías tipo *canal* convencionales de áreas transversales menores de $\sim 0.1\mu\text{m}^2$. Para mayores *fill factor*, Fig. 14(h), 14(i), la guía opera exclusivamente en el régimen de dispersión geométrica para todos los grados de asimetría pero presenta una variación en la longitud de onda de máxima dispersión para el *fill factor* de 1:10, Fig. 14(h), mientras que para el caso de 1:25 dicha longitud de onda se mantiene prácticamente constante, Fig. 14(i) [26].

Es interesante notar que los casos $k=0.5$ en la Fig. 14(e) y $k=0$ en Fig. 14(g) presentan perfiles de dispersión bastante planos sobre un cierto rango espectral. Atribuimos este comportamiento a la transición entre los dos regímenes dispersivos diferentes. Para las tres áreas transversales consideradas, hemos realizado simulaciones similares considerándose un *fill factor* de valor 1:50 y

hemos obtenido que los resultados presentan pequeños cambios en las curvas de dispersión cuando se modifica el grado de asimetría.

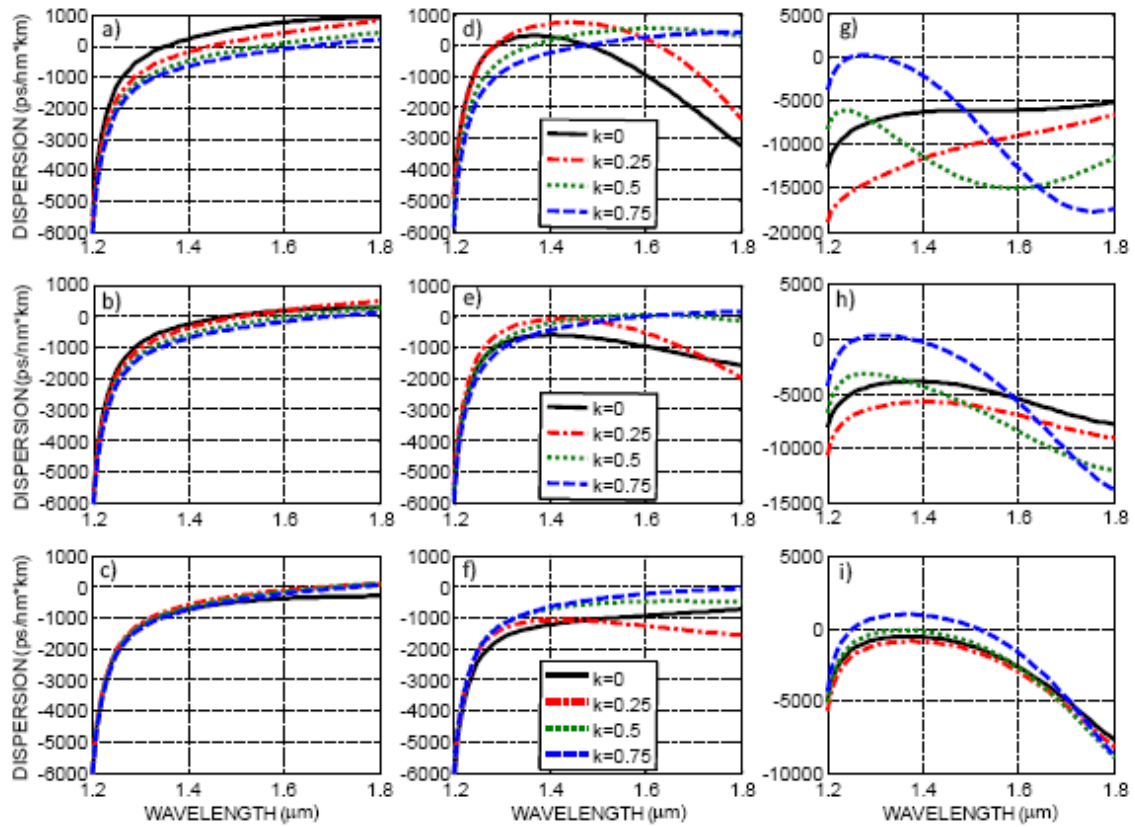


Fig. 14. Perfiles de dispersión cromática de guías *slot* asimétricas para diferentes grados de asimetría. Se han considerado tres áreas transversales diferentes: (a-c) $1\mu\text{m}^2$, (d-f) $0.5\mu\text{m}^2$ y (g-i) $0.1\mu\text{m}^2$, con un *aspect ratio* fijo de 1:1.5. Cada fila se corresponde con un valor de *fill factor*, 1:5, 1:10 y 1:25 respectivamente [26]

V. Diseño de guías ranuradas con dispersión plana

V.1. Introducción

Existen una gran cantidad de aplicaciones en las que el guiado de la luz que presenta baja dispersión cromática es un aspecto muy importante, como por ejemplo el ajuste de fase de señales de datos para la maximización de las interacciones no lineales en procesamiento de señal o bien la transmisión de señales de datos de alto ancho de banda. Un factor clave en las fibras ópticas y las guías fotónicas integradas es conseguir una dispersión baja y muy plana en un rango de longitudes de onda muy ancho.

Se ha demostrado que la dispersión plana cercana a cero puede conseguirse en fibras ópticas. Aunque si bien se podría argumentar que las guías de silicio son típicamente tan cortas que la dispersión cromática no causa ningún efecto significativo en la evolución de los pulsos de picosegundos, por el contrario sí que importa en muchas otras aplicaciones importantes como por ejemplo la propagación de pulsos de femtosegundos, la conversión de longitud de onda de banda ultra ancha y la generación de peines de frecuencia. Además, un perfil de dispersión optimizado en las guías de silicio podría ser beneficioso para reducir el desajuste de fase y aligerar los requisitos de alta potencia de bombeo en los procesos no lineales [13].

Sin embargo, en cuanto a guías de silicio se refiere, conseguir perfiles de dispersión plana es una tarea complicada debido al ajustado confinamiento de la luz en su propagación y a la fuerte dispersión geométrica en las guías integradas altamente no lineales. Una dispersión geométrica fuerte produce que la dispersión global sea altamente dependiente con la longitud de onda y degrada el comportamiento plano de los perfiles dispersivos.

La mejora en la planitud de las curvas de dispersión se consigue mediante la adición de una capa de nitruro de silicio o la introducción de un *slot*. Un objetivo loable sería conseguir guías de baja dispersión que puedan operar sobre rangos de longitudes de onda extensos, permitiendo potencialmente una eficiencia no lineal alta, bajos requerimientos de potencia, un ancho de banda de operación grande y la propagación controlable de pulsos ópticos de femtosegundos [13].

V.2. Dispersión plana

Como hemos comentado anteriormente, un control de la planitud que presenta el perfil de dispersión cromática se puede realizar mediante el uso de una estructura tipo guía *slot*. En este sentido, L. Zhang *et al.* [13] han propuesto una guía ranurada horizontal compuesta de nanocristales de silicio en la ranura como la mostrada en la Fig. 15, donde a partir de una guía ranurada SOI, se añade una guía tipo *strip* para producir un cierto nivel de dispersión geométrica adicional. Posteriormente, se invierte el acoplador *slot/strip* para facilitar los procedimientos de fabricación posteriores. Finalmente, se elimina la capa de guía *strip* para conseguir de esta manera la planitud en las curvas de dispersión cromática.

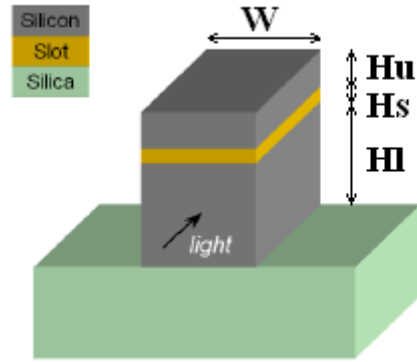


Fig. 15. Guía híbrida *strip/slot* propuesta para el diseño de perfiles de dispersión cromática planos [13]

A pesar de que la guía propuesta parece una guía ranurada convencional, cabe destacar que se trata de una guía híbrida *strip/slot* conforme a la física de guiado de luz. Para longitudes de onda cortas, la capa de bajo índice funciona como una barrera que confina la mayor parte de la luz dentro de la parte de silicio inferior, lo que da lugar a un modo *strip*. A medida que la longitud de onda aumenta, la luz se va extendiendo hacia la parte de silicio superior, con lo que se mejora el campo eléctrico en el slot formándose un modo *slot*. Tal modo de transición, aunque sutil, es, en principio, similar al modo de acoplamiento descrito anteriormente y produce dispersión geométrica cóncava que compensa la dispersión convexa existente. Este mecanismo de guiado de la luz es diferente a aquellos referenciados anteriormente [13].

Tomando en dicha estructura híbrida los valores $H_u=265\text{nm}$, $H_s=50\text{nm}$, $H_l=510\text{nm}$ y $W=500\text{nm}$, se obtienen las curvas de dispersión mostradas en la Fig. 16, donde también se muestra el parámetro β_2 [13]. Como se puede observar, se obtiene un valor de dispersión de $0\pm 16\text{ ps/nm}\cdot\text{km}$ en el intervalo de longitudes de onda comprendido entre 1562 y 2115nm, así como tres longitudes de onda de dispersión cero situadas en 1595, 1828 y 2062nm.

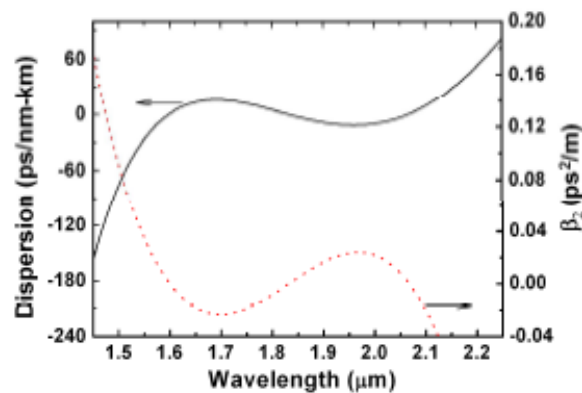


Fig. 16. Perfil de dispersión plano en una guía híbrida *strip/slot* [13]

Las contribuciones del silicio y de los nanocristales de Si de la ranura contribuyen a que el valor de dispersión global varíe con la longitud de onda debido a la transición de modo. Además, la potencia óptica dentro del *slot* se incrementa solamente desde 2.2 a 10.3% de la potencia total a medida que aumenta la longitud de onda desde 1400nm a 2200nm. Esto implica que se podría reemplazar la ranura de nanocristales de silicio por otros materiales con índice de refracción similar tales como SiO₂ manteniendo el nivel bajo y plano de dispersión [13].

Atendiendo a esto, nuestro objetivo es encontrar perfiles de dispersión planos en una guía slot mucho más sencilla, ya que, en primer lugar, la ranura estará compuesta solamente por SiO₂ y, en segundo lugar, utilizaremos la configuración vertical de la guía ranurada, lo que conlleva una mayor facilidad a la hora de fabricar los diseños propuestos.

V.3. Resultados obtenidos

Comencemos eligiendo un diseño de guía ranurada específico que presenta un comportamiento de dispersión bastante plana [26]. En concreto, trabajaremos sobre una guía ranurada de dimensiones $h=258\text{nm}$, $w=387\text{nm}$, $A=0.1\mu\text{m}^2$ y *fill factor* $t/w = 1:5$. Como se muestra en la Fig. 17, esta estructura exhibe dispersión constante plana de valor $D \sim -6000 \text{ ps/nm*km}$ en el intervalo espectral comprendido entre $1.4\mu\text{m}$ y $1.6\mu\text{m}$. Sobre este diseño, analizaremos el efecto que provoca sobre el perfil de GVD la variación del *fill factor* mientras mantenemos constantes tanto el área transversal como la relación altura-anchura. En particular, en la Fig. 17 se muestra los resultados obtenidos al tomar valores de *fill factor* de 1:4, 1:5 y 1:6. Como se puede observar, para el valor mayor de *fill factor*, 1:4, la GVD aumenta gradualmente para longitudes de onda mayores. Por el contrario, para el valor de *fill factor* más pequeño, 1:6, el perfil de GVD presenta un comportamiento cualitativamente diferente, ya que en la curva se observan dos extremos relativos (un máximo y un mínimo) en la ventana espectral asumida. Por lo tanto, para dos longitudes de onda específicas los términos dispersivos de tercer orden se anulan.

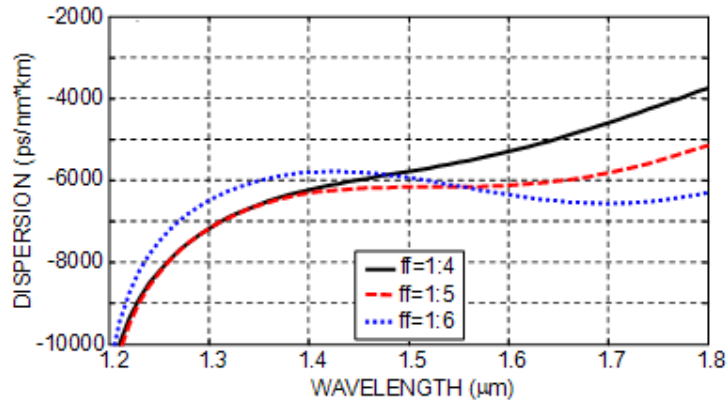


Fig. 17. Perfiles de dispersión cromática de guías ranuradas con área transversal constante, $0.1\mu\text{m}^2$ y diferentes valores de *fill factor*

A partir de estos resultados, hemos realizado un análisis más exhaustivo de este régimen de dispersión mediante una sintonización más fina de los valores de *fill factor*, como se muestra en la Fig. 18. En concreto, se pueden conseguir valores de dispersión de $D \sim -6275 \pm 15 \text{ ps/nm*km}$ en una ventana espectral de 150nm cuando el *fill factor* toma el valor de 1:5.55, como se muestra en el *inset* de la Fig. 18.

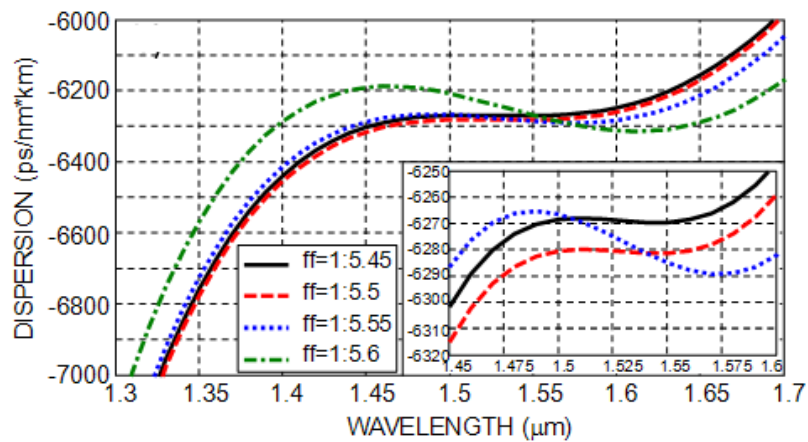


Fig. 18. Comportamiento de dispersión plana con diferentes valores de *fill factor* alrededor de 1:5.5

Otro aspecto importante son las configuraciones de guías que proporcionan comportamiento plano y GVD casi cero simultáneamente en una región ancha de longitudes de onda. Para tal propósito, hemos realizado un diseño diferente basado en la modificación del área transversal manteniendo constantes otros parámetros estructurales. Consideremos una guía *slot* con área transversal $A=0.5\mu\text{m}^2$, relación altura-anchura 1:1.5 y *fill factor* con valor 1:10 [26]. Incrementando el área transversal, obtenemos los perfiles de GVD que se muestran en la Fig. 19 con $A=0.56\mu\text{m}^2$. Nótese que se obtiene un valor máximo de GVD cercano a cero a la longitud de onda $\sim 1.55\mu\text{m}$.

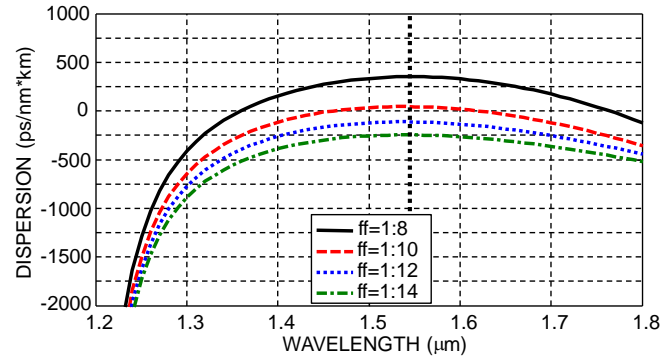


Fig. 19. Perfiles de GVD en una guía *slot* simétrica de área transversal $0.56\mu\text{m}^2$ para diferentes valores de *fill factor*

Posteriormente, hemos analizado el efecto que produce la variación del *fill factor* en el intervalo de valores $\{1:8, 1:14\}$. Como se puede observar en la Fig. 19, la curva de dispersión se desplaza, mientras que la longitud de onda que proporciona el máximo valor de GVD permanece constante en $1.55\mu\text{m}$. Un comportamiento dispersivo similar se puede encontrar en el caso de las guías ranuradas horizontales tipo *strip* de nanocristales de silicio o bien *chalcogenide glass* [12].

VI. Conclusiones

El propósito fundamental de este trabajo ha sido el estudio y análisis de los perfiles de dispersión cromática que presentan diferentes estructuras nanofotónicas en tecnología de silicio, en el intervalo de longitudes de onda de $1.2\mu\text{m}$ a $1.8\mu\text{m}$. En particular, se han diseñado y optimizado guías ranuradas de silicio con el fin de obtener perfiles planos. Para ello, se han variado los parámetros geométricos de la estructura, más concretamente el área transversal y el *fill factor*. Los principales resultados y conclusiones que extraemos del trabajo realizado son:

1. Se ha descrito el fenómeno de la dispersión cromática en el contexto de la propagación de la radiación en medios guiados y se han diferenciado los dos tipos de dispersión cromática que contribuyen al comportamiento dispersivo global de un medio genérico, esto es, la dispersión del material y la dispersión geométrica.
2. Se ha realizado un estudio de la dispersión cromática en una guía SOI ranurada. Además, hemos identificado y optimizado los parámetros estructurales que permiten la modificación del perfil de GVD de la guía, en nuestro caso el área transversal, el *fill factor* de la guía y el grado de asimetría del *slot*. Se han mostrado los resultados correspondientes a diferentes áreas transversales, lo que lleva a distintos regímenes dispersivos, así como diferentes grados de asimetría para cada configuración propuesta.
3. Se han analizado y optimizado los parámetros estructurales de la guía ranurada con el fin de obtener perfiles de GVD planos. Por una parte, para guías con áreas transversales pequeñas, $\sim 0.1\mu\text{m}^2$, encontramos una curva de dispersión plana en un ancho de banda extenso. Por otra parte, para guías con dimensiones mayores, $\sim 0.56\mu\text{m}^2$, nos encontramos con curvas de dispersión cromática que presentan un máximo de dispersión cercano a cero y constante, esto es, centrado en $\lambda \approx 1.55\mu\text{m}$ para los diferentes valores de *fill factor* considerados.

VII. Líneas futuras

Como se ha comentado anteriormente, la principal línea futura de este trabajo de investigación es la implementación práctica y comprobación de los resultados teóricos de los perfiles de dispersión cromática planos obtenidos en las guías ranuradas diseñadas a lo largo del trabajo. Hay que destacar que, en los últimos años, varios grupos investigadores han logrado fabricar guías de silicio similares a las analizadas en este trabajo por lo que la demostración experimental de las estructuras propuestas parece viable.

Por otra parte, también es interesante extender el análisis a estructuras más complejas, como pueden ser las guías de ranura múltiple, que pueden proporcionar más grados de libertad en el proceso de diseño y control de la dispersión.

En un contexto más práctico, una de las potenciales aplicaciones de las guías de silicio como dispositivo dispersivo se enmarca en el ámbito del diseño de sistemas de comunicaciones ópticas. Es bien conocido que la dispersión cromática juega un papel limitante en la capacidad de transmisión de datos a través de una guía de ondas. Un control apropiado de la dispersión puede, por tanto, mejorar la capacidad de transmisión de información.

Otro de los campos donde la dispersión cromática adquiere especial relevancia es en el ámbito de la óptica no lineal. En este sentido, el control del perfil de dispersión puede provocar que los efectos no lineales en la guía sean incrementados, disminuidos o incluso anulados, dependiendo de lo que requiera la aplicación. En este sentido, la capacidad de controlar la dispersión cromática permite, a su vez, optimizar la eficiencia de los fenómenos no lineales que tienen lugar en estructuras nanofotónicas de silicio.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Generalitat Valenciana (Grant GV/2009/044), por la Universidad Politécnica de Valencia (Grant PAID-06-08/3276) y por el Ministerio de Ciencia e Innovación (TEC2008-06333 y TEC2008-06380).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Marcuse, *Pulse distortion in single-mode fibers*, Applied Optics, 19, 10, 1653-1660 (1980).
- [2] G.P. Agrawal, *Fiber Optic Communication System*, Ed. Wiley-Interscience (2002).
- [3] G.P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Ed. Academic Press (2001).
- [4] H.K. Tsang et al., *Optical dispersion, two-photon absorption and self-phase modulation in silicon waveguides at wavelength*, Applied Physics Letters, 80, 3, 416-418 (2002).
- [5] L. Yin et al., *Dispersion tailoring and soliton propagation in silicon waveguides*, Optics Letters, 31, 9, 1295-1297 (2006).
- [6] E. Dulkeith et al., *Group index and group velocity dispersion in silicon-on-insulator photonic wires*, Optics Express, 14, 9, 3853-3863 (2006).
- [7] A.C. Turner et al., *Tailored anomalous group-velocity dispersion in silicon channel waveguides*, Optics Express, 14, 10, 4357-4362 (2006).
- [8] V.R. Almeida et al., *Guiding and confining light in void nanostructure*, Optics Letters, 29, 11, 1209-1211 (2004).
- [9] Q. Xu et al., *Experimental demonstration of guiding and confining light in nanometer-size low-refractive-index material*, Optics Letters, 29, 14, 1626-1628 (2004).
- [10] Z. Zheng, M. Iqbal, J. Liu, *Dispersion characteristics of SOI-based slot optical waveguides*, Optics Communications, 281, 20, 5151-5155 (2008).
- [11] P. A. Anderson et al., *High confinement in silicon slot waveguides with sharp bends*, Optics Express, 14, 20, 9197-9202 (2006).
- [12] L. Zhang et al., *Flat and low dispersion in highly nonlinear slot waveguides*, Optics Express, 18, 12, 13187-13193 (2010).
- [13] L. Zhang et al., *Flattened dispersion in silicon slot waveguides*, Optics Express, 18, 19, 20529-20534 (2010).
- [14] M. Lipson, *Guiding, Modulating and Emitting Light on Silicon – Challenges and Opportunities*, Journal of Lightwave Technology, 23, 12, 4222-4238 (2005).
- [15] G.T. Reed et al., *Silicon Photonics, an introduction*, Ed. John Wiley & Sons (2004).
- [16] J. Heebner et al., *Optical Microresonators, Theory, Fabrication and Applications*, Ed. Springer (2007).
- [17] B. Tattian, *Fitting refractive-index data with the Sellmeier dispersion formula*, Applied Optics 23, 24, 4477-4485 (1984).
- [18] A. Melloni et al., *Waveguide index contrast: implications for passive integrated optical components*, Proceedings of IEEE/LEOS (2005).
- [19] F. Dell’Olio et al., *Optical sensing by optimized silicon slot waveguides*, Optics Express, 15, 8, 4977-4993 (2007).

- [20] C.A. Barrios, *High-performance all-optical silicon microswitch*, *Electronic Letters*, 40, 14, 862-863 (2004).
- [21] C.A. Barrios et al., *Electrically driven silicon resonant light emitting device based on slot-waveguide*, *Optics Express*, 13, 25, 10092-10101 (2005).
- [22] C. Koos et al., *Nonlinear silicon-on-insulator waveguides for all-optical signal processing*, *Optics Express*, 15, 10, 5976-5990 (2007).
- [23] N.N. Feng et al., *Low-loss compact-size slotted waveguide polarization rotator and transformer*, *Optics Letters*, 32, 15, 2131-2133 (2007).
- [24] V.R. Almeida et al., *Light Guiding in Low Index Materials using High-Index-Contrast Waveguides*, *Materials Research Society Symposium Proceedings* (2004).
- [25] P. Sanchis et al., *Design of Silicon-Based Slot Waveguide Configurations for Optimum Nonlinear Performance*, *Journal of Lightwave Technology*, 25, 5, 1298-1305 (2007).
- [26] S. Mas et al., *Tailoring the dispersion behavior of silicon nanophotonic slot waveguides*, *Optics Express*, 18, 20, 20839-20844 (2010).