

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 833 462**

21 Número de solicitud: 202031056

51 Int. Cl.:

G02F 1/225

(2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN

B2

22 Fecha de presentación:

20.10.2020

43 Fecha de publicación de la solicitud:

15.06.2021

Fecha de modificación de las reivindicaciones:

28.10.2022

Fecha de concesión:

03.12.2022

45 Fecha de publicación de la concesión:

14.12.2022

73 Titular/es:

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
(100.0%)**

**Servicio de Promoción y Apoyo a Investigación,
Innovación y Transferencia -i2T; Camí de Vera,
s/n - Edificio 8G - Acceso A/B - Planta 3
46022 Valencia (Valencia) ES**

72 Inventor/es:

**TORRIJOS MORÁN, Luis y
GARCÍA RUPÉREZ, Jaime**

74 Agente/Representante:

ILLESCAS TABOADA, Manuel

54 Título: **MÉTODO PARA MAXIMIZAR EL DESFASE EN UNA GUÍA BIMODAL DE CRISTAL FOTÓNICO**

57 Resumen:

Método para maximizar el desfase en una guía bimodal de cristal fotónico.

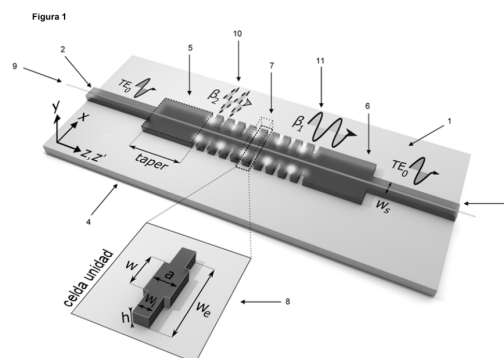
Método para maximizar el desfase entre dos modos de propagación (β_1 , β_2) de una onda de luz, de longitud de onda (λ), que se propaga a través de una estructura de cristal fotónico (1), en la dirección espacial en la que el cristal muestra periodicidad que comprende las siguientes etapas:

(a) obtener el diagrama de bandas del cristal fotónico de estructura periódica para los vectores de onda (k), cuyos valores se encuentren en la primera zona de Brillouin;

(b) seleccionar el modo de propagación (β_2) de la onda (λ) en la estructura periódica del cristal fotónico, donde dicho modo tenga una pendiente P2 de la longitud de onda (λ) respecto al vector de onda, de valor absoluto $|P2|$, trabajando en el régimen de onda lenta;

(c) seleccionar un modo de propagación (β_1) de dicha onda (λ), donde dicho modo tenga una pendiente P1 de la longitud de onda (λ) respecto al vector de onda, de valor absoluto $|P1|$, donde $|P1|$ sea al menos dos veces superior a $|P2|$; y

(d) provocar dicho desfase entre los modos de propagación (β_1 , β_2) seleccionados en los pasos (b) y (c) al propagar dicha onda (λ) a través de dicha guía de onda de cristal fotónico (1), en la dirección en la que el cristal muestra periodicidad.



Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 41 LP 24/2015.
Dentro de los seis meses siguientes a la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial cualquier persona podrá oponerse a la concesión. La oposición deberá dirigirse a la OEPM en escrito motivado y previo pago de la tasa correspondiente (art. 43 LP 24/2015).

ES 2 833 462 B2

DESCRIPCIÓN**MÉTODO PARA MAXIMIZAR EL DESFASE EN UNA GUÍA BIMODAL DE CRISTAL FOTÓNICO****Campo de la invención**

5

La presente invención se refiere al campo del electromagnetismo, en particular al de la interferometría, en la que se hace interferir diferentes modos de una misma onda luminosa que se propaga a través de una guía de onda con estructura periódica.

10 **Estado de la técnica**

En el campo de la nanofotónica, es crucial contar con interferómetros ópticos que puedan, junto con otros dispositivos fotónicos, integrarse en chips de reducido tamaño, para el desarrollo de un gran número de sistemas, tales como redes de comunicaciones ópticas, filtros WDM, conmutadores ópticos, moduladores ópticos o dispositivos de análisis con aplicación en diversos sectores industriales.

El principal inconveniente para lograr una adecuada miniaturización de los actuales interferómetros fotónicos es la necesidad de disponer de caminos ópticos excesivamente largos para conseguir los desfases necesarios en cada aplicación, lo que repercute negativamente a la hora de su integración en chips. Éste es el caso de los interferómetros ópticos más usados en el estado de la técnica, los interferómetros Mach-Zehnder (MZI). En este tipo de sistemas MZI, la luz se divide en dos caminos ópticos independientes y se recombina a la salida para crear un patrón de interferencia. El desfase entre las señales ópticas de ambos brazos, se consigue introduciendo algún cambio en el índice de refracción de uno de dichos brazos ópticos. Sin embargo, los caminos ópticos diseñados deben ser lo suficientemente largos como para acumular un desfase considerable, imposibilitando por tanto, reducir el tamaño final del dispositivo fotónico en cuestión. Además de los mencionados problemas, estos sistemas también presentan problemas de integración al necesitar estructuras fotónicas adicionales que sean capaces de separar la luz en los dos brazos ópticos diferentes y volver a recombinarla a su salida.

Otras soluciones presentes en el estado de la técnica para conseguir desfases de señal adecuados en dispositivos interferómetros con dimensiones reducidas, consisten en la utilización de materiales plasmónicos o la utilización de diseños complejos, lo que se traduce en un gran aumento de la complejidad de los procesos de fabricación y del coste.

Breve descripción de la invención

En este contexto, la solución planteada en la presente invención se basa en utilizar una guía de onda con estructura periódica de tamaño reducido en la que se maximiza el desfase entre dos modos de un mismo haz de luz, que se propagan a través de dicha guía de onda.

La presente invención se refiere a un método para maximizar el desfase entre dos modos de propagación (β_1 , β_2) de una onda de luz, de longitud de onda (λ), que se propaga a través de una estructura de cristal fotónico (1), en la dirección espacial en la que el cristal muestra periodicidad que comprende las siguientes etapas:

- (a) obtener el diagrama de bandas del cristal fotónico de estructura periódica para los vectores de onda (k) cuyos valores se encuentren en la primera zona de Brillouin;
- (b) seleccionar el modo de propagación (β_2) de la onda (λ) en la estructura periódica del cristal fotónico, donde dicho modo tenga una pendiente P_2 de la longitud de onda (λ) respecto al vector de onda, de valor absoluto $|P_2|$, trabajando en el régimen de onda lenta;
- (c) seleccionar un modo de propagación (β_1) de dicha onda (λ), donde dicho modo tenga una pendiente P_1 de la longitud de onda (λ) respecto al vector de onda, de valor absoluto $|P_1|$, donde $|P_1|$ sea al menos dos veces superior a $|P_2|$; y
- (d) provocar dicho desfase entre los modos de propagación (β_1 , β_2) seleccionados en los pasos (b) y (c) al propagar dicha onda (λ) a través de dicha guía de onda de cristal fotónico (1), en la dirección en la que el cristal muestra periodicidad.

Adicionalmente, la presente invención se refiere a un cristal fotónico (1) que es un guía de onda capaz de llevar a cabo el método para maximizar un desfase entre dos modos de propagación (β_1 , β_2) de la presente invención. Adicionalmente, la presente invención se refiere a un cristal fotónico para generar una diferencia en la velocidad de grupo entre un modo de propagación β_1 y un modo de propagación de mayor orden β_2 , de un haz de luz de longitud de onda λ , que se propaga por dicho cristal fotónico, donde dicho cristal fotónico comprende una única capa plana de semiconductor, caracterizado porque dicha capa plana de semiconductor comprende:

- (i) un primer terminal de entrada de dicho haz de luz y un segundo terminal de salida de dicho haz,
- (ii) un eje z , alineado sobre un eje de propagación de dicha luz,
- (iii) una altura h , medida en el eje y , perpendicular al eje z ,
- (iv) una anchura medida en el eje x , perpendicular a los ejes y y z ,

(v) las siguientes secciones alineadas sobre el eje z:

- una primera sección (5) que comprende un primer terminal y un segundo terminal, de longitud t_1 , medido en el eje z y anchura w_{t1} , medida en el eje x, donde el primer terminal de dicha capa plana de semiconductor es el primer terminal de dicha primera sección,

5 - una tercera sección (6) que comprende un primer terminal y un segundo terminal, de longitud t_3 , medido en el eje z, y anchura w_{t3} , medida en el eje x, donde el segundo terminal de dicha capa plana de semiconductor es el segundo terminal de dicha tercera sección,

- una segunda sección de estructura periódica (7), que comprende un primer terminal y un segundo terminal, situada entre el segundo terminal de la primera sección y el primer terminal de la tercera sección, donde la segunda sección comprende N celdas unidad, donde cada celda (8) comprende:

(a) una parte central de longitud w_i , medida en el eje z, y anchura w_e , medida en el eje x; y

15 (b) dos alas que se extienden de dicha parte central en el eje z, donde cada ala es de longitud $(a-w_i)/2$, medida en el eje z, y anchura w , medida en el eje x

donde:

- N es un número entero que es al menos 50 ;

- h es un valor seleccionado dentro del rango de entre 100 y 1000 nm;

- t_1 es un valor seleccionado dentro del rango de entre 500 y 3000 nm;

20 - t_3 es un valor seleccionado dentro del rango de entre 500 y 3000 nm;

- w_{t1} es un valor seleccionado dentro del rango de entre 1000 y 5000 nm;

- w_{t3} es un valor seleccionado dentro del rango de entre 1000 y 5000 nm;

- w_i es un valor seleccionado dentro del rango entre 50 y $(a - 50)$ nm;

- w_e es un valor seleccionado dentro del rango entre 1000 y 5000 nm;

25 - w es un valor seleccionado dentro del rango entre 300 y 1000 nm;

- a es un valor seleccionado dentro del rango entre 200 y 1000 nm; y

- λ es un valor menor que 2000 nm.

Asimismo, la presente invención se refiere a un interferómetro que comprende el cristal fotónico de la presente invención.

Es más, la presente invención se refiere al uso del cristal fotónico de la presente invención, o del dispositivo interferométrico fotónico de la presente invención, como modulador fotónico, como sensor de índice de refracción para la detección de cambios en el índice bruto de una concentración de un compuesto entre muestras depositadas sobre dicho cristal fotónico o dicho

interferómetro, respectivamente, o como sensor de detección de sustancias químicas o biológicas.

La presente invención también se refiere a un método para la detección de una variación en una propiedad óptica de un objeto o entorno, usando el cristal fotónico de la presente invención o el interferómetro de la presente invención, donde dicho método comprende las siguientes etapas:

(i) medir un parámetro de la luz de salida del cristal fotónico o del interferómetro, respectivamente, al pasar luz de una longitud de onda (λ) por dicho cristal fotónico en un momento T_0 , cuando aún no se ha producido ninguna variación en dicha propiedad de dicho objeto o entorno;

(ii) medir un parámetro de la luz de salida del cristal fotónico o del interferómetro, respectivamente, en un momento T , cuando se haya producido una variación en dicha propiedad de dicho objeto o entorno;

(iii) determinar si hay una diferencia entre los parámetros de los pasos (i) y (ii) donde, cuando se determina alguna diferencia, se determina que se ha producido una variación en dicha propiedad óptica de dicho objeto o entorno.

Descripción de las figuras

Figura 1 muestra una realización específica de la forma geométrica del dispositivo interferométrico de la presente invención que comprende un cristal fotónico (1) y un sustrato (4). Más concretamente, se aprecian las 3 partes que forman el cristal fotónico: una guía monomodo de acceso (2), una guía bimodal periódica y una guía monomodo a la salida (3), donde la guía bimodal periódica comprende una primera sección (taper de entrada, 5), una tercera sección (taper de salida, 6) y una segunda sección de estructura periódica (7) que a su vez comprende celdas de unidad (8). Además se aprecian el haz de luz (9), y los modos de propagación β_1 (línea continua) y β_2 (línea punteada) de diferentes ordenes. También se representan de forma más detallada las dimensiones de una celda unidad que se repite a lo largo del eje de propagación de la luz en la estructura geométrica que, en esta realización, son $a = 370$ nm, anchura del elemento transversal $w_i = 220$ nm, longitud del elemento transversal $w_e = 1400$ nm, anchura del guía central $w = 600$ nm y altura $h = 220$ nm, y anchura de guía monomodo $w_s = 450$ nm.

Figura 2. A. Diagrama de bandas de la estructura de cristal fotónico bimodal unidimensional con la longitud de onda (nm, Y) en función del vector de onda (k_z) (X) para las tres primeras bandas de paridad par para la polarización transversal-eléctrico (TE), donde el modo de propagación β_1 se representa por la línea continua, el modo de propagación β_2 se representa por la línea punteada, la zona bimodal se representa por la región sombreada (III) y el cono de luz se representa por la región sombreada (IV). **B.** Parte real de la componente x del campo eléctrico para el modo fundamental (β_1) en el plano xz para $y = 0$. **C.** Parte real de la componente x del campo eléctrico para el modo de orden superior (β_2) en el plano xz para $y = 0$. Los patrones de campo se calculan en la tercera banda para $k_x = 0.365 \, 2\pi/a$ y $k_x = 0.475 \, 2\pi/a$.

Figura 3 muestra de forma esquemática el funcionamiento del dispositivo. En concreto se muestra en línea continua el espectro de transmisión (Y) en escala lineal en función de la longitud de onda (X). En línea punteada se representa el espectro de transmisión desplazado cuando se varían las propiedades ópticas del entorno. En el espectro se aprecia una forma senoidal como consecuencia de las interferencias modales producidas a la salida del interferómetro, siendo la separación entre estas interferencias (ya sean constructivas o destructivas), el rango espectral libre (Q). Se han representado las interferencias modales más agrupadas para longitudes de onda bajas, debido a un comportamiento de onda lenta de la guía periódica en este rango de longitudes de onda.

Figura 4 muestra la diferencia de desfases de los modos (Y) frente a la longitud de onda (X) entre dos eventos diferentes al variar las propiedades ópticas del dispositivo. Se aprecia como el desfase aumenta considerablemente para aquellas longitudes de onda bajas donde se produce el fenómeno de onda lenta.

Figura 5 muestra una gráfica que representa el espectro de transmisión normalizado (Y) en escala logarítmica frente a la longitud de onda (X), obtenido de forma experimental con el diseño mostrado en la Figura 1. Se aprecia como las interferencias modales se agrupan en longitudes de onda bajas debido a la aparición del fenómeno de onda lenta.

Figura 6 muestra una gráfica que representa la diferencia de desfase de los modos (Y), frente a variaciones de temperatura en el dispositivo (X) para una interferencia modal situada en la zona de onda lenta. En concreto se han considerado incrementos de 25, 50 y 75 °C, partiendo desde una situación inicial de 25 °C.

Figura 7. A. Segunda y tercera banda para diferentes longitudes de elementos transversales w_e (el resto de los parámetros de diseño son los mismos detallados en la realización ejemplificada). Las contribuciones del modo fundamental (β_1) y de orden superior (β_2) a la formación de bandas en la región bimodal se muestran en línea continua y línea punteada, respectivamente. **B.** Compromiso entre la diferencia de velocidad de grupo entre ambos modos $[|V_{g1} - V_{g2}| \text{ (c}^{-1}\text{)}, \text{ puntos circulares}]$ y el ancho de banda bimodal (nm, puntos triangulares), en función de diferentes valores w_e . La diferencia de velocidad de grupo se ha calculado para aquellas longitudes de onda en el borde inferior de la ROI (Region Of Interest) bimodal donde se obtiene un comportamiento de luz lenta para el orden superior. **C.** Relación entre la potencia de salida y la de entrada calculada como un coseno al cuadrado del desplazamiento de fase en función de la longitud de onda. Se consideran varias longitudes w_e , que representan la evolución del patrón de interferencia como resultado del comportamiento lento de la luz.

Figura 8. A. Espectros de transmisión para una realización del interferómetro de cristal fotónico bimodal ejemplificado en la descripción, sin y con un taper rectangular de 1200 nm con los parámetros de diseño detallados anteriormente y para $N = 150$ celdas unidad repetidas a lo largo del eje z . El área sombreada representa la región de interés del interferómetro, correspondiente a la región bimodal cerca del PBG. **B.** Excitación modal obtenida de la diferencia de amplitud entre una interferencia constructiva y una destructiva en el espectro para diferentes longitudes de taper. El recuadro detalla el valor considerado en un boceto 3D. **C.** Valor absoluto del campo eléctrico (e-field) para el plano xz y $y = 0$ en la interfaz de salida entre la parte periódica bimodal y la guía de onda monomodo sin un taper rectangular entre interfaces. **D.** Valor absoluto del campo eléctrico (e-field) para el plano xz y $y = 0$ en la interfaz de salida entre la parte periódica bimodal y la guía de onda monomodo con un taper rectangular entre interfaces. **E.** Amplitud FFT (Fast Fourier Transform) de la componente x del campo eléctrico (FFT x-field, a.u.) a lo largo de la dirección de propagación z ($k_z, 2\pi/a$) para diferentes longitudes de onda (nm) en la región bimodal. Las líneas discontinuas con más separación entre sí y las líneas discontinuas centrales en el plano de longitud de onda- k_z representan las relaciones de dispersión del modo fundamental y de orden superior, respectivamente. Se muestran la zona irreducible y la segunda zona de Brillouin.

Figura 9. A. Imagen de microscopio electrónico de barrido (SEM) de las estructuras de silicio fabricadas sin una capa de cobertura de sílice. Se muestra una imagen detallada de la interfaz entre las secciones monomodo y bimodal con la presencia de un taper rectangular fabricado de ~ 1400 nm de longitud. **B.** Índice de grupo obtenido experimentalmente utilizando una

realización del cristal fotónico de la presente invención donde $N = 200$ (puntos de datos triangulares) y donde $N = 400$ (puntos de datos circulares) bajo una cubierta de sílice a partir de los puntos de interferencia máximos y mínimos y el índice de grupo de modo fundamental simulado como referencia. Se han realizado tres mediciones experimentales diferentes para obtener las barras de error representadas como la desviación estándar de los datos. La línea discontinua representa los resultados teóricos obtenidos de las simulaciones del diagrama de bandas, que se ha desplazado sólo 5 nm hacia longitudes de onda más bajas para compensar las ligeras desviaciones de fabricación. **C.** Espectros transmitidos normalizados utilizando una realización del cristal fotónico de la presente invención donde $N = 200$ (espectro superior) o donde $N = 400$ (espectro inferior) bajo una cubierta de sílice. Los espectros se han normalizado con respecto a una guía de onda uniforme de referencia medida en las mismas condiciones ambientales. Los datos experimentales en bruto se representan en gris, mientras que las líneas oscuras se refieren a la señal filtrada sin la ondulación de Fabry-Perot creada en las cavidades del circuito fotónico. Las interferencias constructivas y destructivas están marcadas con círculos negros. Los recuadros representan una vista ampliada del espectro de transmisión en la región de luz lenta.

Figura 10. A. Desplazamiento de fase experimental en función de la longitud de onda obtenido utilizando un interferómetro que comprende una realización del cristal fotónico bimodal 1D donde $N = 200$ para diferentes incrementos de temperatura (25 °C, 50 °C y 75 °C, representados por puntos de datos cuadrados, triangulares y circulares, respectivamente). Las líneas discontinuas representan los resultados de la simulación del diagrama de bandas, desplazados 5 nm como en el caso anterior. **B.** Desplazamiento de fase experimental en función de la longitud de onda obtenido utilizando un interferómetro que comprende una realización del cristal fotónico bimodal 1D donde $N = 400$ para diferentes incrementos de temperatura (25 °C, 50 °C y 75 °C, representados por puntos de datos cuadrados, triangulares y circulares, respectivamente). Las líneas discontinuas representan los resultados de la simulación del diagrama de bandas, desplazados 5 nm como en el caso anterior. **C.** Evolución del desplazamiento de fase medido para un incremento lineal en la temperatura del interferómetro que comprende una realización del cristal fotónico con $N = 200$, donde se muestran diferentes longitudes de onda de interferencia mínimas a 1559,68 nm, 1546,51 nm, 1537,76 nm y 1532,13 nm, que representan el aumento de la sensibilidad de fase de la línea inferior hacia la línea superior, respectivamente. Se han realizado cinco mediciones experimentales diferentes para obtener las barras de error representadas. **D.** Evolución del desplazamiento de fase medido para un incremento lineal en la temperatura del interferómetro que comprende una realización del cristal fotónico con $N = 400$, donde se muestran diferentes

longitudes de onda de interferencia mínimas a 1557.24 nm, 1549.73 nm, 1543.73 nm, 1539.23 nm, 1535.75 nm, 1533.08 nm, 1530.54 nm y 1528.95 nm, que representan el aumento de la sensibilidad de fase de la línea inferior hacia la línea superior, respectivamente. Se han realizado cinco mediciones experimentales diferentes para obtener las barras de error representadas. **E.** Detalle del espectro de transmisión normalizado para un interferómetro que comprende una realización del cristal fotónico con $N = 200$ (una longitud de cristal fotónico 1D bimodal de 74 μm) trabajando en la región de luz lenta para un cambio de temperatura de 25 °C, correspondiente a un cambio de fase acumulado de $0,9\pi$. Los datos sin procesar y filtrados se representan con líneas claras y oscuras, respectivamente. **F.** Detalle del espectro de transmisión normalizado para una configuración $N = 400$ (una longitud de cristal fotónico 1D bimodal de 148 μm) trabajando en la región de luz normal para un cambio de temperatura de 75 °C, correspondiente a un cambio de fase acumulado de π . Los datos sin procesar y filtrados se representan con líneas claras y oscuras, respectivamente.

Figura 11. A. Espectros experimentales normalizados obtenidos para un interferómetro que comprende una realización del cristal fotónico con la configuración $N = 400$ fabricado sin una capa de cobertura de sílice cuando la estructura se cubre con diferentes soluciones de etanol (EtOH) en agua desionizada (DIW). Los datos brutos se representan en líneas discontinuas, mientras que el ajuste Lorentziano utilizado para determinar las posiciones mínimas se representa en líneas continuas. **B.** Mediciones de desplazamiento de fase para un interferómetro que comprende realizaciones del cristal fotónico con configuraciones $N = 200$ (línea con pendiente inferior) y $N = 400$ (línea con pendiente superior) en función de incrementos lineales en el índice de refracción del revestimiento. **C.** Sensibilidad a variaciones del índice de refracción obtenida experimentalmente en unidades de desfase ($2\pi\text{rad}/\text{RIUcm} \times 10^3$) frente a la longitud de onda (nm) para un interferómetro que comprende realizaciones del cristal fotónico 1D bimodales con $N = 200$ (puntos triangulares) y $N = 400$ (puntos circulares) como la pendiente del ajuste lineal para diferentes cambios en el índice de refracción del revestimiento. Estos valores se escalan a una longitud de 1 cm para comparar los resultados con la literatura. La línea punteada representa la curva de sensibilidad simulada obtenida de las estructuras de banda teóricas en condiciones similares. La sensibilidad del sensor es mayor para longitudes de onda donde se produce un fenómeno de onda lenta.

Descripción detallada

La presente invención se refiere a un método para maximizar el desfase entre dos modos de propagación (β_1 , β_2) de una onda de luz, de longitud de onda (λ), que se propaga a través de

una guía de onda de cristal fotónico (1), en la dirección espacial en la que dicho cristal muestra periodicidad. Además, la presente invención se refiere a un cristal fotónico (1) que es un guía de onda capaz de llevar a cabo dicho método. Asimismo, la presente invención se refiere a un interferómetro que comprende dicho cristal fotónico.

5

Dicho método es un método para maximizar el desfase entre dos modos de propagación (β_1 , β_2) de una onda de luz, de longitud de onda (λ), que se propaga a través de una guía de onda de cristal fotónico (1) en la dirección espacial en la que dicho cristal muestra periodicidad. Dicha luz preferiblemente es un haz láser con una longitud de onda menor que 2000 nm, más
 10 preferiblemente de entre 1000 y 2000 nm, todavía más preferiblemente entre 1250 y 1750 nm, aun más preferiblemente entre 1465 y 1650 nm, mucho más preferiblemente entre 1520 y 1580 nm o especialmente más preferiblemente entre 1530 y 1570 nm.

15

Dichos modos son dos modos diferentes de todos los posibles modos que se excitarán por el cristal fotónico, donde preferiblemente el modo de propagación β_1 es un modo de menor orden y el modo de propagación β_2 es un modo de mayor orden. Dichos modos más preferiblemente son modos transversales elegidos entre modos TE (transversal eléctrico), modos TM (transversal magnético), modos TEM (transversal electromagnético) y modos híbridos donde hay componentes del campo eléctrico y magnético en la dirección de
 20 propagación. En una realización más preferente de la presente invención, dichos modos β_1 y β_2 son modos TE. Más preferiblemente, el modo de propagación β_1 es el modo fundamental y el modo de propagación β_2 es un modo de mayor orden. Aun más preferiblemente, dichos modos son de la misma paridad y polarización.

25

Dicho desfase viene condicionado por las diferencias en la velocidad de grupo de cada modo por comportamientos dispersivos. Así, al maximizar la diferencia entre las velocidades de grupo de los modos de propagación (β_1 , β_2), se maximiza dicho desfase entre los modos de propagación (β_1 , β_2). Así, la velocidad de grupo de un modo de propagación es menor que la velocidad de grupo del otro modo de propagación. La velocidad de grupo se define como la
 30 derivada de la frecuencia angular respecto al vector de onda, es decir, la pendiente de las bandas obtenidas en el diagrama de bandas. Por consiguiente, el cristal fotónico producirá ciertos pliegues en las bandas y:

35

(i) el modo de mayor orden (β_2) se selecciona de entre todos los modos de propagación de la onda (λ) en la estructura periódica del cristal fotónico, donde dicho modo tenga una pendiente P2 de la longitud de onda (λ) respecto al vector de onda, de valor absoluto $|P_2|$ en el régimen de onda lenta; y, por el otro lado,

(i) el modo de menor orden (β_1) se selecciona de entre todos los modos de propagación de la onda (λ) en la estructura periódica del cristal fotónico, donde dicho modo tenga una pendiente P_1 de la longitud de onda (λ) respecto al vector de onda, de valor absoluto $|P_1|$, donde $|P_1|$ sea al menos dos veces superior a $|P_2|$.

5

Así, en una realización preferente de la presente invención, la velocidad de grupo del modo de propagación β_2 es menor que la velocidad de grupo del modo de propagación β_1 .

10

Los modos de la luz que se propagan en régimen de onda lenta, presentan una velocidad de grupo cercana a cero, como consecuencia de las múltiples reflexiones que experimentan en los elementos de la guía de onda con estructura periódica. Seleccionando un modo de propagación en régimen de onda lenta frente a otro modo que se propaga en un régimen de onda dispersivo normal [el modo tendrá una pendiente que sea al menos dos veces la del modo de propagación en régimen de onda lenta (β_2)], como el modo fundamental de la luz, que se propaga por el eje central de la estructura periódica de la guía, permite maximizar el desfase de trabajo sin la necesidad de utilizar grandes caminos ópticos. Este efecto se identifica en la propia banda tercera (ver la Figura 2A) cuando el modo de propagación β_1 es el modo fundamental y el modo de propagación β_2 es un modo de mayor orden, donde para longitudes de onda bajas dentro de la zona bimodal, el modo de mayor orden sufre un comportamiento altamente dispersivo, reduciendo así su velocidad de grupo de forma drástica en comparación con el modo fundamental. Por todo esto, en el rango de longitudes de onda que comprende la banda tercera, se obtienen dos modos completamente diferenciados, ortogonales entre sí y con distribuciones de campo diferentes. En concreto, el modo fundamental está casi completamente confinado en la guía central de la estructura periódica, mientras que el modo de mayor orden se extiende hacia los elementos transversales del cristal fotónico. Debido a esto, se produce un efecto dispersivo sobre el modo de mayor orden, lo cual significa que su velocidad de grupo se verá reducida para aquellas longitudes de onda donde la pendiente de la banda logre valores cercanos a cero.

20

25

30

Así, dicho método comprende las siguientes etapas:

(a) obtener el diagrama de bandas del cristal fotónico de estructura periódica para los vectores de onda (k), cuyos valores se encuentren en la primera zona de Brillouin;

(b) seleccionar el modo de propagación (β_2) de la onda (λ) en la estructura periódica del cristal fotónico, donde dicho modo tenga una pendiente P_2 de la longitud de onda (λ) respecto al vector de onda, de valor absoluto $|P_2|$ trabajando en el régimen de onda lenta;

35

(c) seleccionar un modo de propagación (β_1) de dicha onda (λ), donde dicho modo tenga una pendiente P_1 de la longitud de onda (λ) respecto al vector de onda, de valor absoluto $|P_1|$, donde $|P_1|$ sea al menos dos veces superior a $|P_2|$; y

(d) provocar dicho desfase entre los modos de propagación (β_1 , β_2) seleccionados en los pasos (b) y (c) al propagar dicha onda (λ) a través de dicha guía de onda de cristal fotónico (1), en la dirección en la que el cristal muestra periodicidad.

En una realización preferida, el valor absoluto $|P_1|$ de la pendiente del modo de propagación (β_1) es al menos 4 veces superior al valor absoluto $|P_2|$ de la pendiente del modo de propagación (β_2), más preferiblemente al menos 10 veces superior al valor absoluto $|P_2|$ de la pendiente del modo de propagación (β_2), todavía más preferiblemente al menos 100 veces superior al valor absoluto $|P_2|$ de la pendiente del modo de propagación (β_2), aun más preferiblemente al menos 1000 veces superior al valor absoluto $|P_2|$ de la pendiente del modo de propagación (β_2).

En una realización alternativa, dicho método comprende las siguientes etapas:

(a) obtener el diagrama de bandas del cristal fotónico de estructura periódica para los vectores de onda (k), cuyos valores se encuentren en la primera zona de Brillouin;

(b) seleccionar el modo de propagación (β_2) de la onda (λ) en la estructura periódica del cristal fotónico, donde dicho modo tenga un pendiente próxima a cero o la más próxima a cero, de entre todos los modos de propagación de la onda (λ);

(c) seleccionar un modo de propagación (β_1) de dicha onda (λ), tenga una pendiente positiva elevada o la mayor pendiente positiva de entre todos los modos de propagación de la onda (λ); y

(d) provocar dicho desfase entre los modos de propagación (β_1 , β_2) seleccionados en los pasos (b) y (c) al propagar dicha onda (λ) a través de dicha guía de onda de cristal fotónico (1), en la dirección en la que el cristal muestra periodicidad.

Dicho cristal fotónico (1) es una guía de onda capaz de llevar a cabo los métodos de la presente invención. En al menos una dirección espacial dicho cristal muestra periodicidad.

En una realización preferible de la presente invención, dicho cristal fotónico puede tener periodicidad unidimensional, bidimensional o tridimensional, es decir dicho cristal fotónico puede mostrar periodicidad en una, dos o tres direcciones, respectivamente.

Dicho cristal fotónico puede ser de cualquier material y comprender cualquier característica o dimensión para mostrar dicha periodicidad. La adaptabilidad del diseño propuesto a estructuras periódicas en una, dos o tres dimensiones y a otros materiales y a otras frecuencias del espectro electromagnético, permite la escalabilidad de las estructuras periódicas presentadas en dicho cristal fotónico.

Preferiblemente, dicho cristal fotónico es de silicio, óxido de silicio (sílice), óxido de titanio, o un polímero. En una realización preferente de la presente invención, dicho cristal fotónico es de silicio o silicio dopado. Más preferiblemente, dicho cristal fotónico es de silicio o silicio dopado que comprende al menos un elemento seleccionado de fósforo, arsénico, antimonio, bismuto, litio, boro, aluminio, galio, indio, germanio, nitrógeno, o un metal como oro, platino o cobre. En una realización preferente, dicho cristal fotónico es de silicio o silicio dopado, donde el silicio dopado comprende silicio dopado tipo N, tipo P o de otro tipo, donde silicio dopado tipo N comprende silicio dopado con al menos un elemento seleccionado de fósforo, arsénico, antimonio, bismuto y litio, silicio dopado tipo P comprende silicio dopado con al menos un elemento seleccionado de boro, aluminio, galio y indio.

En una realización preferente de la presente invención, el cristal fotónico comprende una guía monomodo de entrada y otra de salida. Dichas guías monomodo preferiblemente tienen una anchura medida en el eje x, perpendicular a los ejes y y z, de w_s , donde w_s es menor que w_e .

En una realización preferente de la presente invención, el cristal fotónico es para generar una diferencia en la velocidad de grupo entre un modo de propagación β_1 y un modo de propagación de mayor orden β_2 , de un haz de luz de longitud de onda λ , que se propaga por dicho cristal fotónico, donde dicho cristal fotónico comprende una única capa plana de semiconductor, caracterizado porque dicha capa plana de semiconductor comprende:

- (i) un primer terminal de entrada de dicho haz de luz y un segundo terminal de salida de dicho haz,
- (ii) un eje z, alineado sobre un eje de propagación de dicha luz,
- (iii) una altura h, medida en el eje y, perpendicular al eje z,
- (iv) una anchura medida en el eje x, perpendicular a los ejes y y z,
- (v) las siguientes secciones alineadas sobre el eje z:
 - una primera sección (5) que comprende un primer terminal y un segundo terminal, de longitud t_1 , medido en el eje z y anchura w_{t1} , medida en el eje x, donde el primer terminal de dicha capa plana de semiconductor es el primer terminal de dicha primera sección,

- una tercera sección (6) que comprende un primer terminal y un segundo terminal, de longitud t_3 , medido en el eje z, y anchura w_{t3} , medida en el eje x, donde el segundo terminal de dicha capa plana de semiconductor es el segundo terminal de dicha tercera sección,
 - una segunda sección de estructura periódica (7), que comprende un primer terminal y un segundo terminal, situada entre el segundo terminal de la primera sección y el primer terminal de la tercera sección, donde la segunda sección comprende N celdas unidad, donde cada celda (8) comprende:
 - (a) una parte central de longitud w_i , medida en el eje z, y anchura w_e , medida en el eje x; y
 - (b) dos alas que se extienden de dicha parte central en el eje z, donde cada ala es de longitud $(a-w_i)/2$, medida en el eje z, y anchura w, medida en el eje x
 donde:
 - N es un número entero que es al menos 50;
 - h es un valor seleccionado dentro del rango de entre 100 y 1000 nm;
 - t_1 es un valor seleccionado dentro del rango de entre 500 y 3000 nm;
 - t_3 es un valor seleccionado dentro del rango de entre 500 y 3000 nm;
 - w_{t1} es un valor seleccionado dentro del rango de entre 1000 y 5000 nm;
 - w_{t3} es un valor seleccionado dentro del rango de entre 1000 y 5000 nm;
 - w_i es un valor seleccionado dentro del rango entre 50 y $(a - 50)$ nm;
 - w_e es un valor seleccionado dentro del rango entre 1000 y 5000 nm;
 - w es un valor seleccionado dentro del rango entre 300 y 1000 nm;
 - a es un valor seleccionado dentro del rango entre 200 y 1000 nm; y
 - λ es un valor menor que 2000 nm.
- Así, en otras palabras, la segunda sección de estructura periódica (7) comprende N celdas unidad y N+1 separadores, donde cada celda comprende una parte central de longitud w_i , medido en el eje z, y anchura w_e , medido en el eje x, y cada celda esta separada de la celda adyacente y/o del segundo terminal de la primera sección o del primer terminal de la tercera sección por un separador, donde cada separador es de longitud $(a-w_i)$, medido en el eje z, y anchura w, medido en el eje x.

Así, en esta realización preferida, la primera sección (5) es un taper y la tercera sección (6) es otro taper, y la segunda sección es la parte de la guía que comprende la estructura periódica (7) formada por las celdas unidad (8). Dichas tres secciones son partes del mismo cristal. De la misma manera, cada celda unidad de la estructura periódica (7) son partes del mismo cristal, y

la parte central y los dos alas de cada celda unidad tambien son partes del mismo cristal, siendo dicho cristal fotónico un unico cristal.

Preferiblemente, el número N de celdas unidad de la segunda sección (2), es un número entero N que es al menos 100, más preferiblemente seleccionado dentro del rango entre 100 a 100000, todavia más preferiblemente entre 100 y 10000, aún más prefereiblemente entre 150 y 5000. En una realizacion aún más preferida de la presente invencion, el número N de celdas unidad de la segunda sección (2), es un número entero seleccionado dentro del rango entre 200 a 400.

En una realizacion de la presente invención, h es un valor seleccionado dentro del rango de entre 100 y 1000 nm. Preferiblemente, h es un valor seleccionado dentro del rango de entre 150 y 500 nm, más preferiblemente entre 200 y 300 nm, todavia más preferiblemente entre 200 y 250 nm.

En una realizacion de la presente invención, t_1 es un valor seleccionado dentro del rango de entre 500 y 3000 nm y t_3 es un valor seleccionado dentro del rango de entre 500 y 3000 nm. Preferiblemente, t_1 y t_3 son valores independientemente seleccionados dentro del rango de entre 1000 y 1600 nm, más preferiblemente entre 900 y 1500 nm, todavia más preferiblemente entre 1200 y 1400 nm.

En una realizacion de la presente invención, w_{t1} es un valor seleccionado dentro del rango de entre 1000 y 5000 nm, w_{t3} es un valor seleccionado dentro del rango de entre 1000 y 5000 nm, y w_e es un valor seleccionado dentro del rango entre 1000 y 5000 nm. Preferiblemente, w_{t1} , w_{t3} y w_e son valores independientemente seleccionados dentro del rango de entre 1300 y 1500 nm, más preferiblemente entre 1350 y 1450 nm, todavia más preferiblemente entre 1375 y 1425 nm.

En una realizacion de la presente invención, w_i es un valor seleccionado dentro del rango entre 50 y $(a - 50)$ nm. Preferiblemente, w_i es un valor seleccionado dentro del rango de entre 100 y 900 nm, más preferiblemente entre 200 y 300 nm, todavia más preferiblemente entre 200 y 250 nm.

En una realizacion de la presente invención, w es un valor seleccionado dentro del rango entre 300 y 1000 nm. Preferiblemente, w es un valor seleccionado dentro del rango de entre 400 y 750 nm, más preferiblemente entre 500 y 700 nm, todavia más preferiblemente entre 550 y 650 nm.

En una realizacion de la presente invención, a es un valor seleccionado dentro del rango entre 200 y 1000 nm. Preferiblemente, a es un valor seleccionado dentro del rango de entre 300 y 750 nm, más preferiblemente entre 350 y 400 nm, todavia más preferiblemente entre 360 y 390 nm.

- 5 Preferiblemente, dicho cristal fotónico comprende una única capa plana de semiconductor depositada sobre una capa plana de aislante. Más preferiblemente dicho aislante es sílice o un polímero no conductivo.

En una realizacion aún más preferida del cristal fotónico de la presente invencion:

- 10 - el semiconductor es silicio;
 - el aislante es de sílice,
 - N es un número entero que es al menos 100;
 - h es un valor seleccionado dentro del rango de entre 200 y 250 nm;
 - t_1 y t_3 son valores independientemente seleccionados dentro del rango de entre 1000 y
 15 1600 nm;
 - w_i es un valor seleccionado dentro del rango entre 200 y 250 nm;
 - w_e , w_{t1} y w_{t3} son valores independientemente seleccionados dentro del rango entre 1300 y 1500 nm;
 - w es un valor seleccionado dentro del rango entre 500 y 700 nm;
 20 - a es un valor seleccionado dentro del rango entre 350 y 400 nm; y
 - λ es un valor seleccionado dentro del rango entre 1300 y 1600 nm

En una realizacion aún más preferida del cristal fotónico de la presente invencion:

- 25 - el semiconductor es silicio;
 - el aislante es de sílice,
 - N es un número entero seleccionado dentro del rango de entre 200 y 10000;
 - h es un valor seleccionado dentro del rango de entre 200 y 250 nm;
 - t_1 y t_3 son valores independientemente seleccionados dentro del rango de entre 1200 y 1400 nm;
 30 - w_i es un valor seleccionado dentro del rango entre 200 y 250 nm;
 - w_e , w_{t1} y w_{t3} son valores independientemente seleccionados dentro del rango entre 1350 y 1450 nm;
 - w es un valor seleccionado dentro del rango entre 500 y 700 nm;
 - a es un valor seleccionado dentro del rango entre 350 y 400 nm; y
 35 - λ es un valor seleccionado dentro del rango entre 1530 y 1570 nm.

En las realizaciones aquí ejemplificados, en el cristal fotónico:

- el semiconductor es silicio;
- el aislante es de sílice,
- N es un número entero seleccionado dentro del rango de entre 200 y 400;
- 5 - h es 220 nm;
- t_1 y t_3 son valores seleccionados dentro del rango de entre 1200 y 1400 nm;
- w_i es 220 nm;
- w_e , w_{t1} y w_{t3} son 1400 nm;
- w es 600 nm;
- 10 - a es 370 nm; y
- λ es un valor seleccionado dentro del rango entre 1530 y 1570 nm.

En una realización ejemplificada, donde N es 200 el cristal fotónico tiene una longitud de 78 μm , y en otra donde N es 400 el cristal fotónico tiene una longitud de 148 μm .

15

Así, una realización ejemplificada del cristal fotónico está basado en una estructura fotónica creada en silicio, sobre un sustrato de óxido de silicio que consta de una guía monomodo de entrada y otra de salida, y de la estructura periódica bimodal, Figura 1. La guía de entrada, que soporta el modo fundamental de la luz con polarización transversal-eléctrico (TE), es la encargada de excitar y transmitir su potencia a los dos modos propagantes por la estructura periódica unidimensional, el modo fundamental y el modo de mayor orden, ambos de paridad par. A su vez, los dos modos propagantes por la guía periódica serán los encargados de excitar el modo fundamental de la guía monomodo a la salida, cuya potencia dependerá del desfase producido entre los dos modos a lo largo de la estructura periódica. Esta estructura periódica unidimensional está compuesta por la repetición de una celda básica unidad a lo largo del eje de propagación de la luz, y de una pequeña transición de guía homogénea entre las guías monomodo y la estructura periódica bimodal. Los parámetros de diseño son la periodicidad a, la anchura del elemento transversal w_i , la longitud del elemento transversal w_e , la anchura de la guía central w y la altura h, y con una anchura para las guías de entrada y salida w_s .

30

Al tratarse de una estructura periódica, se deben calcular los diagramas de bandas de la celda unidad para poder conocer el comportamiento de los modos propagantes. Se computarán y se tendrán en cuenta solamente los modos de la polarización considerada (en esta implementación se consideran TE), que son aquellos se excitarán por las guías de entrada dispuestas. En concreto, la primera banda está compuesta por el primer modo fundamental, mientras que la segunda y tercera banda es una mezcla del primer modo fundamental con el modo de mayor

35

orden. En el diagrama de bandas, se obtiene también la presencia de bandas prohibidas (en inglés, photonic band-gaps), que son aquellas regiones en longitud de onda o frecuencia donde no se transmite la luz y ésta es totalmente reflejada o radiada. Las bandas segunda y tercera se originan al haber una intersección del primer modo de luz fundamental plegado en la zona irreducible de Brillouin con el segundo modo de luz de mayor orden. En teoría de estructuras periódicas, dos modos de la misma paridad y polarización no pueden intersectar y en su lugar las bandas se repelen, formando un pliegue alrededor de este punto. De esta forma, se obtienen dos regímenes bimodales en las bandas segunda y tercera formados por el modo fundamental y el modo de mayor orden. En el marco teórico de la presente invención, el estudio se centró en la tercera banda que es aquella que presenta un comportamiento dispersivo para el modo de mayor orden.

Así, se ha diseñado una celda unidad con una región bimodal donde se produzcan velocidades de grupo realmente reducidas para el modo de mayor orden, maximizando así el efecto y la sensibilidad del interferómetro. El espectro de transmisión contiene interferencias más agrupadas para aquellas longitudes de onda donde el modo de mayor orden se comporta de forma altamente dispersiva, en contraposición a lo que ocurre para longitudes de onda mayores, donde el modo de mayor orden no es tan dispersivo. Es por tanto en esta región del espectro en la que se producen un mayor número de picos espectrales donde el interferómetro obtendrá sus mejores prestaciones.

Por otro lado, la colocación de la transición de guía homogénea entre las guías monomodo de entrada y la estructura bimodal periódica es fundamental para excitar correctamente ambos modos en la estructura periódica. De no disponer de tal transición, sólo el modo fundamental sería excitado en la guía periódica, perdiendo así su funcionamiento bimodal y su capacidad de hacer interferir señales. El tamaño de la transición debe diseñarse con el fin de maximizar los picos espectrales producidos por las interferencias bimodales, de tal forma que la excitación del modo de mayor orden sea la adecuada.

El patrón de interferencias del espectro de transmisión nos indica que para los máximos se está produciendo una interferencia constructiva entre los dos modos: un desfase producido múltiplo de 2π . En cambio, en aquellos valores mínimos del patrón de interferencias, el desfase entre los modos es múltiplo de π . Por lo tanto, obteniendo el espectro de transmisión en dos escenarios diferentes donde se han variado las propiedades ópticas del entorno, se puede calcular la diferencia de desfase producido entre ambos casos. Para lograr un mayor valor de desfase acumulado, y teniendo en cuenta que el desfase escala linealmente con la longitud del

interferómetro, los diseños interferométricos convencionales están compuestos por largos caminos ópticos, lo cual no es deseable en términos de integración. En la presente invención, no sería necesario aumentar excesivamente la longitud del interferómetro para obtener desfases acumulados considerables, ya que se está reduciendo la velocidad de grupo de una de las señales ópticas, que a su vez, es más sensible a sufrir mayores variaciones de su fase. En el sistema presentado en la invención, el modo fundamental actúa como referencia ya que acumula un desfase menor al variar las propiedades ópticas del entorno, por lo que es el modo de mayor orden el que actuará como señal sensible a variaciones ópticas.

La presente invención también se refiere a un interferómetro que comprende el cristal fotónico aquí definido. Al pasar dicha luz por dicho interferómetro, se genera interferencias entre los modos β_1 y β_2 en el cristal de manera que se cambia un parámetro de la luz emitida del cristal fotónico o del interferómetro.

Así, el cristal fotónico y el dispositivo interferométrico integrado de la presente invención representan un producto ultra compacto y altamente sensible a variaciones del entorno que afecten a la señal óptica. Además, tiene un diseño sencillo que puede ser fácilmente llevado a cabo usando procesos de fabricación aptos para su producción en masa. Todo esto permite la implementación de este dispositivo en un chip junto con otros elementos ópticos integrados, de tal forma que su reducido tamaño ayude a la integración de múltiples diseños en un área reducida.

La presente invención también se refiere al uso de dicho cristal o dicho interferómetro como modulador fotónico, como sensor de índice de refracción para la detección de cambios en el índice bruto de una concentración de un compuesto entre muestras depositadas sobre dicho cristal fotónico o dicho interferómetro, respectivamente, o como sensor de detección de sustancias químicas o biológicas.

Para dichos usos se determina una variación en una propiedad óptica de un objeto o entorno en las proximidades de dicho cristal fotónico o dicho interferómetro.

La presente invención también se refiere a un método para la detección de una variación en una propiedad óptica de un objeto o entorno, usando el cristal fotónico o el interferómetro de la presente invención, donde dicho método comprende las siguientes etapas:

- (i) medir un parámetro de la luz de salida del cristal fotónico o del interferómetro, respectivamente, al pasar luz de una longitud de onda (λ) por dicho cristal fotónico en un momento T_0 , cuando aún no se ha producido ninguna variación en dicha propiedad de dicho objeto o entorno;
- 5 (ii) medir un parámetro de la luz de salida del cristal fotónico o del interferómetro, respectivamente, en un momento T , cuando se haya producido una variación en dicha propiedad de dicho objeto o entorno; y
- (iii) determinar si hay una diferencia entre los parámetros de los pasos (i) y (ii) donde, cuando se determina alguna diferencia, se determina que se ha producido una variación en
- 10 dicha propiedad óptica de dicho objeto o entorno.

Así el momento T_0 es anterior al momento T . En una realización preferida de la presente invención, el parámetro de la luz emitida es el rango espectral libre, medido como la distancia entre dos picos máximos en el patrón de interferencias espectral a la salida del dispositivo, donde

15 hay una diferencia entre los parámetros de los pasos (i) y (ii), cuando el desfase entre patrones de interferencias espectrales de los pasos (i) y (ii) es mayor que cero.

En otra realización preferida de la presente invención, el método comprende el paso adicional de determinar la influencia de dicha variación mediante la obtención de la relación que se produce entre la diferencia determinada en el paso (iii), con respecto al cambio en la propiedad

20 óptica de dicho objeto o entorno.

Ejemplos:

25 *Materiales y métodos*

Las simulaciones numéricas para obtener los diagramas de bandas de la celda unitaria básica del cristal fotónico 1D se llevaron a cabo utilizando el software gratuito MIT Photonics Band (MPB), que calcula los estados propios de frecuencia definida por las ecuaciones de Maxwell en estructuras dieléctricas periódicas. Emplea métodos numéricos de Expansión de Ondas

30 Planas (Plane Wave Expansion (PWE) en inglés) en espacios completamente vectoriales y tridimensionales. En particular, se usó silicio ($n = 3.477$) con un coeficiente termoóptico de $1.8 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ para la estructura periódica, y sílice ($n = 1.444$) con un grid-step de 10 nm como malla para el sustrato y el revestimiento. Se computaron las primeras 5 bandas tipo TE, incluidas las primeras 3 que presentan una paridad par con respecto al plano $x = 0$. Por otro

lado, las simulaciones de los espectros de transmisión y la excitación de campo se calcularon numéricamente utilizando el software CST Microwave Studio. Más detalladamente, se utilizó un solucionador 3D en el dominio del tiempo totalmente vectorial que utiliza técnicas de integración finita para simular todo el sistema interferométrico, incluidas las guías de onda monomodo y bimodal. Se utilizó una rejilla hexaédrica de 20 celdas por longitud de onda para toda la estructura, con sílice como fondo. A su vez, la FFT (Fast Fourier Transform en inglés) del campo a lo largo del eje z se obtuvo utilizando 5000 puntos para obtener los modos propagados en la sección bimodal. La excitación de la estructura se realizó mediante puertos de guía de onda estándar en la entrada y salida, con el objetivo de proporcionar los parámetros de dispersión.

Las estructuras fotónicas se fabricaron en una oblea de silicio sobre aislante (SOI) con un espesor de capa de silicio de 220 nm y una capa inferior de sílice de 2 μm . Se empleó un voltaje de aceleración de 30 KeV y un tamaño de apertura de 30 μm en el proceso de litografía por haz de electrones usado para crear las estructuras fotónicas en una resina negativa de silsesquioxano de hidrógeno (HSQ); luego, se empleó un ataque con plasma acoplado inductivamente para transferir los patrones diseñados a la capa de silicio. Para la caracterización experimental, se utilizó un láser sintonizable (Keysight 81980) de onda continua (CW) y un polarizador TE coherente para acoplar verticalmente la luz en las estructuras fotónicas mediante el uso de fibras ópticas cortadas cerca de acopladores de rejilla. En la salida, se empleó un medidor de potencia (Keysight 81636B) sincronizado con el láser para medir la respuesta de los circuitos ópticos. Los espectros transmitidos fueron registrados digitalmente por una aplicación de LabVIEW, también responsable de controlar la temperatura del chip mediante el uso de un calentador Peltier conectado al soporte de cobre de la muestra fotónica. Se utilizó un periodo de tiempo de 5 minutos después de los cambios de temperatura para permitir que la muestra se estabilizara en las condiciones deseadas. Para llevar a cabo los experimentos de detección, el chip se colocó en un recipiente hermético y se cubrió con el agua desionizada (DIW) o soluciones crecientes de etanol (EtOH) en DIW directamente depositadas sobre la muestra y se midió después de un tiempo de estabilización de 5 minutos.

Resultados

I. Principio de funcionamiento

El diseño propuesto, que se muestra en la Figura 1, se basa completamente en una estructura de silicio rodeada por un revestimiento de sílice, donde una guía de onda de entrada monomodo, que soporta el modo fundamental de la polarización transversal eléctrica (TE), transfiere su potencia a los dos primeros modos pares TE en la región bimodal del cristal fotónico 1D: TE_0 y TE_2 . Estos dos modos se propagan a través del cristal fotónico 1D y, después de una cierta distancia, interfieren en la discontinuidad abrupta con la guía de onda monomodo de salida, contribuyendo a la excitación del modo TE fundamental en la salida.

Por tanto, la potencia transferida se puede expresar en función del desplazamiento de fase acumulado entre ambos modos en la región bimodal. En consecuencia, al igual que con un interferómetro Mach-Zehnder (MZI) convencional, midiendo el patrón de interferencia en los espectros de transmisión, se obtuvo información sobre el cambio de fase entre ambos modos y cómo varía cuando se induce un cambio en el índice de refracción. Además, se coloca un taper rectangular en la transición entre la guía de onda de cristal fotónico monomodal y bimodal para la excitación modal eficiente en la sección periódica. A su vez, la estructura interferométrica bimodal está compuesta por una repetición de una celda unitaria básica que consiste en un elemento transversal o corrugación sobre una guía de onda rectangular central (ver el recuadro de la Figura 1), creando un cristal fotónico 1D en la dirección de propagación del eje z . Los parámetros de diseño de la celda unitaria propuesta son un periodo $a = 370$ nm, ancho de elemento transversal $w_i = 220$ nm, longitud de elemento transversal $w_e = 1400$ nm, ancho de guía de onda central $w = 600$ nm y altura $h = 220$ nm, accedida a su entrada y su salida con una guía de onda monomodo de ancho $w_s = 450$ nm.

La Figura 2A representa el diagrama de dispersión en la zona irreducible de Brillouin del cristal fotónico 1D diseñado, mostrando las bandas de tipo TE que serán excitadas por el modo TE fundamental de la guía de onda de entrada monomodo. En concreto, estas bandas presentan una paridad par con respecto al plano $x = 0$, ya que los modos de paridad impar no se excitarán, como en el caso del modo de primer orden (tipo TE_1), debido a condiciones de simetría en la interfaz entre la guía de onda monomodo y guía de onda bimodal. Como puede verse, se representan las tres primeras bandas, mostrando en línea continua y línea punteada la contribución de los modos fundamental (TE_0) y de segundo orden (TE_2), respectivamente. La primera banda (I) está totalmente formada por el modo fundamental, mientras que la segunda y la tercera bandas (II y III) están compuestas por una combinación de ambos modos. Entre estas dos bandas, se crea una banda fotónica prohibida (PBG) como resultado del punto

de anti-cruce producido por el modo fundamental, plegado en la primera zona de Brillouin y el modo de orden superior. En teoría de cristales fotónicos, cuando dos modos de la misma polarización y paridad se cruzan, se acoplan y las bandas se repelen, produciendo un comportamiento dispersivo similar al que se obtiene cuando una banda alcanza el borde de la zona irreducible de Brillouin ($k_z = 0.5 \times 2\pi/a$). En consecuencia, se obtuvieron dos regímenes bimodales diferentes cerca de la banda prohibida fotónica para la segunda y tercera banda, aunque los resultados actuales se centran en la tercera ya que se pueden lograr velocidades de grupo más bajas en esta región operativa. Por lo tanto, en la tercera banda (III) se obtuvo un comportamiento bimodal con dos constantes de propagación y patrones de campo diferentes (ver Figuras 2B y C) para longitudes de onda alrededor de 1550 nm, que es la región de interés (ROI) (zona III sombreada en la Figura 2A). El modo fundamental está fuertemente confinado dentro de la guía de onda central del cristal fotónico, mientras que el modo de orden superior está parcialmente localizado en los elementos transversales de la estructura. En consecuencia, el modo de orden superior interactúa fuertemente con el patrón periódico de la estructura, produciendo así un comportamiento altamente dispersivo de la tercera banda al final de la zona de Brillouin. La velocidad de grupo, que se describe matemáticamente como la derivada de la frecuencia angular con respecto al vector de onda ($v_g = \partial\omega/\partial k$), viene dada por la pendiente de las bandas para cada valor de k_z en los diagramas de dispersión mostrados anteriormente. Por lo tanto, a altas longitudes de onda en la región de interés se produce luz lenta para ambos modos, lo que no es adecuado para los presentes propósitos. Por el contrario, a longitudes de onda más bajas, solo el modo de orden superior presenta un comportamiento de luz lenta a medida que se aproxima al borde de la zona de Brillouin, en comparación con el comportamiento dispersivo normal del modo fundamental, logrando una alta diferencia de velocidad de grupo entre ambos modos en esta región de longitud de onda.

Bajo variaciones inducidas del índice de refracción en el sistema, el índice efectivo del modo de alto orden cambia drásticamente en comparación con el índice efectivo del modo fundamental que actúa como referencia. En consecuencia, la baja velocidad de grupo del modo de alto orden mejora críticamente el desplazamiento de fase acumulado cuando se induce un cambio en el índice de refracción. Por lo tanto, se obtiene un efecto similar al que ocurre en un interferómetro Mach-Zehnder cuando se aumenta la longitud del brazo para lograr cambios de fase más altos, pero en este caso ralentizando drásticamente el modo de orden superior. Para ello, se estudió la influencia de los parámetros de diseño en la región bimodal de interés en la tercera banda. En la Figura 7A se observa la evolución de las relaciones de dispersión para la segunda y tercera bandas para diferentes valores del

parámetro w_e . El resto de dimensiones de diseño se mantienen como se detalla anteriormente para obtener un comportamiento bimodal alrededor de 1550 nm. Como se puede ver en la Figura 7A, a medida que aumenta w_e , la segunda y tercera bandas se desplazan a longitudes de onda más altas. La contribución del modo de orden superior (parte de las bandas representadas por una línea de puntos) es claramente más sensible a las variaciones de w_e que el modo fundamental (parte de las bandas representadas por una línea continua), ya que el modo de orden superior está más localizado dentro de los elementos transversales de estructura periódica. Tener el control de la frecuencia de corte del modo de orden superior permite diseñar para qué longitudes de onda se produce el efecto de luz lenta de este modo, obteniendo así el comportamiento bimodal deseado. La Figura 7B muestra la diferencia máxima de velocidad de grupo entre ambos modos en la región de luz lenta del modo de orden superior y el ancho de banda de la región bimodal de interés en función de w_e . Como se explicó anteriormente, la diferencia de velocidad de grupo en la región de interés aumenta con w_e hasta que se alcanzan las longitudes de onda cercanas a la banda prohibida fotónica, donde el modo fundamental se convierte también en luz lenta. Por otro lado, el ancho de banda disminuye debido al aplanamiento del modo de orden superior, lo que resulta en regiones bimodales de menor longitud de onda. Se seleccionó un valor w_e de 1400 nm, ya que esta configuración proporciona una gran diferencia de velocidad de grupo y un gran ancho de banda para esta realización. El efecto crítico de w_e también se puede ver si el patrón de interferencia del espectro se calcula como una función sinusoidal del desplazamiento de fase calculado a partir de las bandas de la Figura 7A y para una longitud determinada. En la Figura 7C se puede ver cómo w_e juega un papel crucial en la obtención de un alto número de picos destructivos y constructivos. Con un w_e de 1300 nm solo se forman dos picos de interferencia en la región de interés, mientras que aumentar este parámetro a 1400 nm permite observar hasta 8 picos, como si se tratara de un interferómetro Mach-Zehnder con uno de sus brazos drásticamente más largo que el otro. Además, debe notarse la influencia de la luz lenta del modo de alto orden en la periodicidad del patrón de interferencia (ver Figura 7C), donde se obtienen picos más agrupados para aquellas longitudes de onda donde la diferencia de velocidad de grupo se maximiza.

Para estudiar el comportamiento interferométrico del dispositivo, se analizó la configuración completa con guías de onda monomodo de 450 nm de ancho como puertos de entrada y salida. Los espectros de transmisión para una longitud de $N = 150$ elementos se representan en la Figura 8A, sin y con un taper rectangular de 1200 nm entre el extremo de la guía de onda monomodal y la guía de onda periódica bimodal. Se puede observar que la respuesta es casi plana cuando el taper no está presente, ya que solo el modo fundamental se propaga

a través del cristal fotónico 1D. Al usar un taper rectangular, el modo de orden superior se excita adecuadamente y, por lo tanto, se observa claramente el patrón de interferencia. Además, como se mostró anteriormente en la Figura 7C, el patrón de interferencia está más agrupado para longitudes de onda más bajas, lo que demuestra el comportamiento dispersivo del modo de orden superior en esta región. Este comportamiento aparece para longitudes de onda alrededor de 1532 nm, cerca del final de la zona irreducible de Brillouin para el modo de orden superior, donde se convierte en luz lenta. A longitudes de onda aún más bajas (es decir, por debajo de 1530 nm), solo se propaga el modo fundamental y, por lo tanto, se observa una respuesta mono-modal del espectro de transmisión. La excitación bimodal para un rango de longitudes del taper se optimiza en la Figura 8B, calculada como la diferencia entre un pico máximo y mínimo causado por una interferencia modal. Se obtiene una modulación de amplitud óptima de alrededor del 70% para un taper de 1200 nm de longitud para la interferencia modal más cercana a la banda prohibida fotónica. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la excitación bimodal disminuye para longitudes de onda más bajas, como se puede ver en el área sombreada de la región de interés en la Figura 8A. Para conocer mejor el comportamiento bimodal en las interfaces, el valor absoluto del campo eléctrico en el plano 2D a la salida del interferómetro bimodal se representa sin y con taper para una interferencia destructiva a 1563.5 nm en las Figuras 8C y D, respectivamente. En ausencia de un taper rectangular, toda la energía se transfiere a la guía de onda de salida monomodo, mientras que con un taper hay una interferencia destructiva debido a la excitación bimodal adecuada y casi no se transmite potencia a la guía de onda de salida. Con el objetivo de demostrar que las franjas en el espectro se deben a la interferencia modal, se calculó la componente x del campo eléctrico 1D a lo largo del eje z para $y = 0$ en una estructura periódica bimodal con $N = 150$. Aplicando la Transformada Rápida de Fourier (FFT) sobre el campo propagado, se obtuvieron los vectores de onda que se excitan en la región bimodal. Los resultados se muestran en la Figura 8E en función del vector de onda normalizado y para diferentes longitudes de onda. Cada pico de la Transformada Rápida de Fourier corresponde a un modo de propagación dentro de la guía de onda periódica. Como puede verse, no solo se obtienen los vectores de onda de los modos dentro de la zona de Brillouin irreducible, sino también para la región desplegada entre $k_z = 0.5 \times 2\pi/a$ y $k_z = 0.7 \times 2\pi/a$. Esta segunda zona de Brillouin es una imagen reflejada de la primera región y proporciona información sobre los modos y sus características de dispersión. Sin embargo, se obtiene una concordancia perfecta entre la posición de los picos y los diagramas de bandas previamente calculados, utilizando dos métodos de simulación distintos, que permiten confirmar la excitación modal dentro del cristal fotónico 1D. Tener en cuenta que el modo fundamental a $k_z \sim 0,65 \times 2\pi/a$ tiene una mayor intensidad en comparación con el modo de orden superior a $k_z \sim 0,45 \times 2\pi/a$, lo que

significa que ambos modos no están igualmente excitados y explica los resultados obtenidos en la Figura 8A, con respecto a la amplitud del patrón de interferencia en el espectro de transmisión.

5 II. Demostración experimental del comportamiento bimodal con luz lenta

Se fabricaron interferómetros bimodales con los parámetros de diseño previamente detallados y un taper de longitud nominal de 1200 nm en las interfaces de entrada y salida (ver Figura 9A). Todos los parámetros de las estructuras fabricadas coinciden perfectamente con el diseño teórico, excepto el taper, que tiene una longitud medida de ~ 1400 nm. Esta diferencia se debe a que el taper estaba muy cerca del primer elemento transversal del cristal fotónico 1D (con un gap de solo 60 nm) y este último no se resolvió en la fabricación (ver Figura 9A). A pesar de esta desviación, la longitud del taper fabricado también permanece dentro del rango de excitación bimodal óptimo, como se puede ver en la Figura 8B, por lo que no se espera que se altere el rendimiento experimental. Se han considerado dos longitudes diferentes de cristales fotónicos bimodales de $74\ \mu\text{m}$ y $148\ \mu\text{m}$, correspondientes a un número de elementos periódicos de $N = 200$ y $N = 400$. La longitud total de la muestra fotónica es de $0,9\ \text{mm}$, correspondiente a la longitud en el chip entre acopladores de rejilla de entrada y de salida. Los espectros de transmisión experimentales para ambas configuraciones se muestran en la Figura 9C, donde se puede observar una banda prohibida fotónica para longitudes de onda superiores a $1590\ \text{nm}$, por debajo del cual se obtiene la región bimodal de interés, como se predijo teóricamente en el diagrama de bandas y en las simulaciones de propagación. Los espectros experimentales sin procesar, así como los datos filtrados, se representan para distinguir las interferencias bimodales de la ondulación causada por las resonancias de Fabry-Perot. El rango espectral libre (FSR) de la ondulación se distribuye de manera homogénea y es muy similar al calculado para una distancia de cavidad en el chip de $0,9\ \text{mm}$ ($\sim 1,5\ \text{nm}$), lo que demuestra que esto es causado por la contribución de Fabry-Perot. Además, los resultados muestran el mismo rango espectral libre para las dos longitudes bimodales diferentes consideradas, de modo que la ondulación debe ser causada por una cavidad óptica común en ambos diseños (es decir, las resonancias entre los acopladores de rejilla de acceso).

La posición de las oscilaciones máxima y mínima originadas por las interferencias bimodales constructivas y destructivas, que están marcadas con círculos en la Figura 9C, se obtuvieron aplicando un ajuste Lorentziano sobre los espectros filtrados. Como era de esperar, se observa un mayor número de interferencias bimodales en el espectro para la estructuras con

N = 400 en comparación con N = 200, como resultado del incremento de la longitud óptica física del interferómetro. Para evaluar el comportamiento de luz lenta de un cristal fotónico en configuraciones estándar de interferómetro Mach-Zehnder, el índice de grupo experimental del brazo activo (modo β_2 en este documento) se calcula a partir de las simulaciones del brazo de referencia (modo β_1). Por lo tanto, la dependencia espectral del índice de grupo en el modo de luz lenta de orden superior se puede deducir de las posiciones espectrales de los máximos $\lambda_{\max}$ y mínimos $\lambda_{\min}$ de las interferencias como:

$$n_g^{\beta_2}(\lambda) = \lambda_{\max} \times \lambda_{\min} / 2L(\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) + n_g^{\beta_1}(\lambda) \quad (1)$$

donde L es la longitud de la guía de onda de cristal fotónico bimodal y $n_g^{\beta_1}$ es el índice de grupo del modo fundamental que actúa como señal de referencia. Los marcadores triangular y circular en la Figura 9B representan el índice de grupo experimental en las configuraciones N = 200 y N = 400 utilizando la ecuación descrita anteriormente. El interferómetro de luz lenta bimodal exhibe un índice de grupo de hasta ~ 23 para el modo de orden superior, que coincide perfectamente con las simulaciones. El índice de grupo simulado del modo fundamental que se ha utilizado en la ecuación (1) se muestra con la línea punteada y discontinua en la Figura 9B y presenta valores de índice de grupo inferiores a 5 en la región de interés.

III. Rendimiento interferométrico en sistemas dinámicos

Una vez que se proporciona la respuesta estática, para calcular el desplazamiento de fase acumulado por un cambio inducido en el índice de refracción, también se debe considerar el desplazamiento espectral de un pico de interferencia dado. Además, debido al comportamiento dispersivo de nuestra estructura propuesta, el rango espectral libre (FSR) causado por las interferencias bimodales varía a lo largo de la región de interés, obteniendo valores más bajos en la región de luz lenta. Por lo tanto, el valor medio entre dos rangos espectrales libres contiguos se utiliza para obtener el desplazamiento de fase experimental calculado de la siguiente manera:

$$\Delta\phi(\lambda) = 2\Delta\lambda / (\text{FSR}_H + \text{FSR}_L) \quad (2)$$

donde $\Delta\lambda$ es el desplazamiento de longitud de onda de los mínimos producidos para los cambios inducidos del índice de refracción y FSR_H y FSR_L son los rangos espectrales libres en longitudes de onda más altas y más bajas con respecto a un pico de interferencia mínimo dado, respectivamente.

Para evaluar la respuesta del dispositivo como modulador óptico, se utilizó un calentador Peltier para cambiar la temperatura de funcionamiento del chip. Las Figuras 10A y 10B muestran el desplazamiento de fase obtenido en función de la longitud de onda para diferentes incrementos de temperatura en las configuraciones $N = 200$ y $N = 400$, respectivamente. En ambos casos, el efecto de la luz lenta se vio claramente en longitudes de onda alrededor de 1530 nm, donde se obtuvo un aumento drástico del desfase, lo que concuerda con las simulaciones. Hay que tener en cuenta que los resultados del interferómetro $N = 400$ son el doble de los obtenidos con la configuración más corta debido a la doble longitud utilizada. En las Figuras 10C y 10D se representa un ajuste de la evolución del cambio de fase para diferentes picos mínimos destructivos cuando la temperatura se varió en las configuraciones $N = 200$ y $N = 400$, respectivamente, presentando un comportamiento perfectamente lineal para todas las interferencias disponibles. En la región de luz lenta, se obtuvieron valores de desplazamiento de fase de π para incrementos de temperatura de 30 °C con la interferencia de 1532 nm, correspondiente a un cambio requerido en el índice de refracción del silicio de 5.4×10^{-3} en una longitud de L_{π} de solo 78 μm (ver líneas discontinuas en la Figura 10C). Asimismo, en el interferómetro de 148 μm y a una longitud de onda de 1529 nm, se requirieron 13,2 °C para un cambio de fase π , lo que corresponde a un cambio de índice de refracción del silicio requerido de $2,4 \times 10^{-3}$. Por el contrario, fuera de la región de luz lenta, se obtuvieron valores de desplazamiento de fase de π para un cambio de temperatura de 75 °C para la interferencia de 1550 nm en la configuración de 148 μm de largo, correspondiente a un cambio de silicio requerido de 1.35×10^{-2} RIU (ver líneas discontinuas en la Figura 10D). Sin embargo, incluso en este régimen, los interferómetros son altamente eficientes y presentan un gran ancho de banda, lo que también demuestra una flexibilidad en el diseño en función de la operación deseada. En las Figuras 10E y 10F se muestran ejemplos de los espectros medidos en configuraciones $N = 200$ y $N = 400$ para las diferentes temperaturas consideradas, respectivamente, para operaciones normales y con luz lenta. La señal filtrada también se representa para ver claramente la respuesta de modulación en los espectros transmitidos entre los estados de encendido y apagado. Además, debe tenerse en cuenta que las pérdidas de inserción y la tasa de extinción de los datos brutos dependen en gran medida de la ondulación de las resonancias de Fabry-Perot. No obstante, si se consideran los espectros filtrados como la contribución del comportamiento bimodal, las pérdidas de inserción fueron de alrededor de 2,5 dB para la Figura 10E y prácticamente despreciables en el caso de la Figura 10F. A su vez, se obtuvo una relación de extinción de ~ 10 dB en la región de luz lenta, mientras que aumenta hasta ~ 20 dB fuera de este régimen como resultado de la excitación bimodal mejorada teóricamente predicha.

También se fabricaron estructuras bimodales de luz lenta adicionales sin el revestimiento superior de sílice para investigar el funcionamiento del interferómetro como sensor. Los parámetros de diseño fueron los mismos que se utilizaron anteriormente para evaluar el funcionamiento como modulador óptico mediante cambios de temperatura. Sus espectros de transmisión cuando se depositaron diferentes soluciones de etanol (EtOH) en agua desionizada (DIW) sobre la estructura interferométrica de cristal fotónico 1D se muestran en la Figura 11A. En concreto, se consideraron volúmenes de etanol en agua desionizada de 3%, 6% y 9%, correspondientes a incrementos lineales del índice de refracción de 1.6×10^{-3} , 3.2×10^{-3} y 4.8×10^{-3} RIU con respecto a DIW puro según la literatura. Como se puede observar, la respuesta interferométrica ahora se obtiene para longitudes de onda más bajas (ahora se miden las interferencias ubicadas alrededor de 1515 nm) ya que el revestimiento superior basado en DIW tiene un índice de refracción más bajo que el de la sílice. Por otro lado, el espectro se desplaza hacia longitudes de onda más altas al aumentar el índice de refracción del revestimiento. Al igual que en el caso de los cambios de temperatura, se ha realizado un ajuste Lorentziano sobre las interferencias espectrales para obtener correctamente los picos mínimos causados por el comportamiento bimodal (ver Figura 11A). Asimismo, conocer el desplazamiento espectral debido a los cambios del índice de refracción del revestimiento, permite calcular su correspondiente desplazamiento de fase utilizando la ecuación (2). La Figura 11B muestra el desplazamiento de fase acumulado para las interferencias con la sensibilidad más alta en la región de luz lenta para un incremento lineal en el índice de refracción del revestimiento para las configuraciones $N = 200$ y $N = 400$. La sensibilidad experimental se puede determinar como la pendiente del ajuste del desplazamiento de fase para diferentes cambios del índice de refracción del revestimiento. Se obtienen valores experimentales de hasta $75,20 \times 2\pi \text{ rad} / \text{RIU}$ y $150,83 \times 2\pi \text{ rad} / \text{RIU}$ para una longitud de interferómetro bimodal de $74 \mu\text{m}$ y $148 \mu\text{m}$, respectivamente. Los resultados obtenidos siguen claramente una evolución lineal y presentan un valor dos veces mayor debido a la doble longitud utilizada para esta configuración en comparación con la más corta, de manera similar al caso anterior. Además, los resultados experimentales se han comparado con las simulaciones aplicando la siguiente ecuación para calcular la sensibilidad de fase del interferómetro:

$$S(\lambda) = \Delta\phi / \Delta n_c = 2\pi L / \lambda \times (\partial n_{\text{eff}2} / \partial n_c - \partial n_{\text{eff}1} / \partial n_c) \quad (3)$$

donde n_c es el índice de refracción del revestimiento, L la longitud del interferómetro y $n_{\text{eff}1}$ y $n_{\text{eff}2}$ el índice efectivo del modo fundamental y de orden superior, respectivamente. En los esquemas estándar de interferómetros Mach-Zehnder en los que uno de sus brazos está

completamente aislado, la sensibilidad de fase solo está relacionada con la variación del índice efectivo del brazo sensor. En nuestro caso, ambos modos interactúan con las variaciones del revestimiento, por lo que la sensibilidad depende de la diferencia de índice efectiva entre ellos. Dado que el modo fundamental está fuertemente confinado con un índice de grupo bajo y el modo de orden superior presenta un comportamiento de alta dispersión, se obtienen valores de sensibilidad tremendamente elevados para la guía de onda de cristal fotónico bimodal 1D propuesta. La dependencia de la longitud de onda de la sensibilidad se representa en la Figura 11C, aumentando drásticamente su valor en la región de luz lenta y presentando una concordancia perfecta con las simulaciones. Para comparar estos resultados con otros interferómetros de la literatura de diferentes longitudes, también se han calculado valores normalizados a 1 cm, correspondientes a sensibilidades experimentales casi idénticas de $10,62 \times 10^3 \text{ } 2\pi \text{rad} / \text{RIU} \cdot \text{cm}$ y $10,19 \times 10^3 \text{ } 2\pi \text{rad} / \text{RIU} \cdot \text{cm}$ para las configuraciones con $N = 200$ y $N = 400$, respectivamente, ya que están normalizadas a una longitud común. Asimismo, fuera de la región de luz lenta, se demuestran experimentalmente valores en torno a $3,5 \times 10^3 \text{ } 2\pi \text{rad} / \text{RIU} \cdot \text{cm}$ para un amplio rango de operación de 30 nm, que no son tan buenos como en la región de luz lenta pero que son más altos que los obtenidos para otras configuraciones interferométricas.

IV. Discusión

Las estructuras periódicas bimodales ejemplificadas en el presente documento proporcionan un comportamiento interferométrico que implica modos de alto orden con un desplazamiento de fase extremadamente sensible producido por cambios inducidos en el índice de refracción. En comparación con otras configuraciones bimodales existentes, este diseño hace uso de estructuras de cristal fotónico 1D con un modo activo que trabaja en el régimen de luz lenta. Este efecto ha sido habilitado por un control activo de los diagramas de bandas para optimizar el comportamiento bimodal deseado con el fin de mejorar la respuesta interferométrica. Este procedimiento puede extenderse a cristales fotónicos 2D y 3D.

El dispositivo propuesto se ha demostrado experimentalmente con fines de modulación óptica y detección, para determinar su eficiencia en sistemas dinámicos. Al cambiar la temperatura del chip, se probó la respuesta del interferómetro a pequeños cambios en el índice de refracción de la estructura de silicio. En comparación con otros interferómetros que incluyen elementos de luz lenta, se proporciona un interferómetro de un solo canal con un área de solo $\sim 100 \text{ } \mu\text{m}^2$ para una modulación de temperatura de alta eficiencia, mejorando las estructuras convencionales basadas en interferómetros Mach-Zehnder en dos órdenes de magnitud y

mejorando los esquemas interferométricos, incluido el 2D y cristales fotónicos 1D en más de un orden de magnitud. Debido a su diseño compacto, los resultados sugieren el uso de este tipo de guía de onda de silicio de cristal fotónico bimodal para la integración de múltiples moduladores en chip. También se demostró la operación de detección para diferentes

5 soluciones de etanol en agua desionizada, correspondiente a cambios lineales en el índice de refracción del revestimiento. Las sensibilidades experimentales obtenidas mejoran las configuraciones existentes en un factor de más de 10 en el caso de las configuraciones tradicionales de interferómetro Mach-Zehnder y alrededor de 7,5 para el interferómetro Mach-Zehnder basado en guías de ranura y en guías de onda bimodales de nitruro de silicio, para

10 la misma longitud de detección empleada. Además, su diseño sencillo, monocanal y ultracompacto formado monolíticamente en silicio ofrece notables ventajas para la integración masiva y la producción de bajo coste con implicaciones significativas en interconexiones de redes o instrumentos de laboratorio en chip, entre otros.

15

REIVINDICACIONES

1. Método para maximizar el desfase entre dos modos de propagación (β_1 , β_2) de una onda de luz, de longitud de onda (λ), que se propaga a través de una estructura de cristal fotónico (1), en la dirección espacial en la que el cristal muestra periodicidad que comprende las siguientes etapas:
 - (a) obtener el diagrama de bandas del cristal fotónico de estructura periódica para los vectores de onda (k) cuyos valores se encuentren en la primera zona de Brillouin;
 - (b) seleccionar el modo de propagación (β_2) de la onda (λ) en la estructura periódica del cristal fotónico, donde dicho modo tenga una pendiente P2 de la longitud de onda (λ) respecto al vector de onda, de valor absoluto $|P2|$, trabajando en el régimen de onda lenta;
 - (c) seleccionar un modo de propagación (β_1) de dicha onda (λ), donde dicho modo tenga una pendiente P1 de la longitud de onda (λ) respecto al vector de onda, de valor absoluto $|P1|$, donde $|P1|$ sea al menos dos veces superior a $|P2|$; y
 - (d) provocar dicho desfase entre los modos de propagación (β_1 , β_2) seleccionados en los pasos (b) y (c) al propagar dicha onda (λ) a través de dicha guía de onda de cristal fotónico (1), en la dirección en la que el cristal muestra periodicidad, donde dicho cristal fotónico genera una diferencia en la velocidad de grupo entre el modo de propagación (β_1) y el modo de propagación de mayor orden (β_2), de un haz de dicho luz de longitud de onda (λ), que se propaga por dicho cristal fotónico, donde dicho cristal fotónico comprende una única capa plana de semiconductor, **caracterizado porque** dicha capa plana de semiconductor comprende, a su vez:
 - (i) un primer terminal de entrada de dicho haz de luz y un segundo terminal de salida de dicho haz,
 - (ii) un eje z, alineado sobre un eje de propagación de dicha luz,
 - (iii) una altura h, medida en el eje y, perpendicular al eje z,
 - (iv) una anchura medida en el eje x, perpendicular a los ejes y y z,
 - (v) las siguientes secciones alineadas sobre el eje z:
 - una primera sección (5) que comprende un primer terminal y un segundo terminal, de longitud t_1 , medido en el eje z y anchura w_{t1} , medida en el eje x, donde el primer terminal de dicha capa plana de semiconductor es el primer terminal de dicha primera sección,

- una tercera sección (6) que comprende un primer terminal y un segundo terminal, de longitud t_3 , medido en el eje z, y anchura w_{t3} , medida en el eje x, donde el segundo terminal de dicha capa plana de semiconductor es el segundo terminal de dicha tercera sección,
- 5 - una segunda sección de estructura periódica (7), que comprende un primer terminal y un segundo terminal, situada entre el segundo terminal de la primera sección y el primer terminal de la tercera sección, donde la segunda sección comprende N celdas unidad, donde cada celda (8) comprende:
 - (a) una parte central de longitud w_i , medida en el eje z, y anchura w_e , medida
 - 10 en el eje x, donde dicha parte central comprende un eje z' , alineado con el eje z; y
 - (b) dos alas que se extienden de dicha parte central en el eje z, donde cada ala es de longitud $(a-w_i)/2$, medida en el eje z, y anchura w , medida en el eje x, y comprende un eje z' , alineado con el eje z,
 - 15 donde:
 - N es un número entero que es al menos 50;
 - h es un valor seleccionado dentro del rango de entre 100 y 1000 nm;
 - t_1 es un valor seleccionado dentro del rango de entre 500 y 3000 nm;
 - t_3 es un valor seleccionado dentro del rango de entre 500 y 3000 nm;
 - 20 - w_{t1} es un valor seleccionado dentro del rango de entre 1000 y 5000 nm;
 - w_{t3} es un valor seleccionado dentro del rango de entre 1000 y 5000 nm;
 - w_i es un valor seleccionado dentro del rango entre 50 y $(a - 50)$ nm;
 - w_e es un valor seleccionado dentro del rango entre 1000 y 5000 nm;
 - w es un valor seleccionado dentro del rango entre 300 y 1000 nm;
 - 25 - a es un valor seleccionado dentro del rango entre 200 y 1000 nm; y
 - λ es un valor menor que 2000 nm.
- 2. Un cristal fotónico (1) que es un guía de onda capaz de llevar a cabo el método según la reivindicación 1, donde dicho cristal fotónico genera una diferencia en la velocidad de grupo entre un modo de propagación β_1 y un modo de propagación de mayor orden β_2 , de un haz de luz de longitud de onda λ , que se propaga por dicho cristal fotónico, donde dicho cristal fotónico comprende una única capa plana de semiconductor, **caracterizado porque** dicha capa plana de semiconductor comprende, a su vez:
 - (i) un primer terminal de entrada de dicho haz de luz y un segundo terminal de salida
 - 30 de dicho haz,
 - (ii) un eje z, alineado sobre un eje de propagación de dicha luz,
 - 35

- (iii) una altura h , medida en el eje y , perpendicular al eje z ,
 - (iv) una anchura medida en el eje x , perpendicular a los ejes y y z ,
 - (v) las siguientes secciones alineadas sobre el eje z :
 - una primera sección (5) que comprende un primer terminal y un segundo terminal, de longitud t_1 , medido en el eje z y anchura w_{t1} , medida en el eje x , donde el primer terminal de dicha capa plana de semiconductor es el primer terminal de dicha primera sección,
 - una tercera sección (6) que comprende un primer terminal y un segundo terminal, de longitud t_3 , medido en el eje z , y anchura w_{t3} , medida en el eje x , donde el segundo terminal de dicha capa plana de semiconductor es el segundo terminal de dicha tercera sección,
 - una segunda sección de estructura periódica (7), que comprende un primer terminal y un segundo terminal, situada entre el segundo terminal de la primera sección y el primer terminal de la tercera sección, donde la segunda sección comprende N celdas unidad, donde cada celda (8) comprende:
 - (a) una parte central de longitud w_i , medida en el eje z , y anchura w_e , medida en el eje x , donde dicha parte central comprende un eje z' , alineado con el eje z ; y
 - (b) dos alas que se extienden de dicha parte central en el eje z , donde cada ala es de longitud $(a-w_i)/2$, medida en el eje z , y anchura w , medida en el eje x , y comprende un eje z' , alineado con el eje z ,
- donde:
- N es un número entero que es al menos 50;
 - h es un valor seleccionado dentro del rango de entre 100 y 1000 nm;
 - t_1 es un valor seleccionado dentro del rango de entre 500 y 3000 nm;
 - t_3 es un valor seleccionado dentro del rango de entre 500 y 3000 nm;
 - w_{t1} es un valor seleccionado dentro del rango de entre 1000 y 5000 nm;
 - w_{t3} es un valor seleccionado dentro del rango de entre 1000 y 5000 nm;
 - w_i es un valor seleccionado dentro del rango entre 50 y $(a - 50)$ nm;
 - w_e es un valor seleccionado dentro del rango entre 1000 y 5000 nm;
 - w es un valor seleccionado dentro del rango entre 300 y 1000 nm;
 - a es un valor seleccionado dentro del rango entre 200 y 1000 nm; y
 - λ es un valor menor que 2000 nm.

3. El cristal fotónico según la reivindicación 2, que comprende una guía monomodo de entrada y otra de salida.

4. El cristal fotónico según cualquiera de las reivindicaciones 2 y 3, en el que el cristal fotónico puede tener periodicidad unidimensional, bidimensional o tridimensional.
5. El cristal fotónico según cualquiera de las reivindicaciones 2 a 4, en el que el semiconductor es el silicio o silicio dopado.
6. El cristal fotónico según cualquiera de las reivindicaciones 2 a 5, en el que:
 - el semiconductor es silicio;
 - el aislante es de sílice,
 - N es un número entero que es al menos 100;
 - h es un valor seleccionado dentro del rango de entre 200 y 250 nm;
 - t_1 y t_3 son valores independientemente seleccionados dentro del rango de entre 1000 y 1600 nm;
 - w_i es un valor seleccionado dentro del rango entre 200 y 250 nm;
 - w_e , w_{t1} y w_{t3} son valores independientemente seleccionados dentro del rango entre 1300 y 1500 nm;
 - w es un valor seleccionado dentro del rango entre 500 y 700 nm;
 - a es un valor seleccionado dentro del rango entre 350 y 400 nm; y
 - λ es un valor seleccionado dentro del rango entre 1300 y 1600 nm.
7. El cristal fotónico según cualquiera de las reivindicaciones 2 a 6, en el que el número N de celdas unidad de la segunda sección (2), es un número entero seleccionado dentro del rango entre 200 a 400.
8. El cristal fotónico según cualquiera de las reivindicaciones 2 a 7, en el que los modos de propagación (β_1 , β_2) son de tipo transversal-eléctrico (TE) o transversal-magnético (TM).
9. El cristal fotónico según cualquier de las reivindicaciones 2 a 8, en el que la velocidad de grupo del modo de propagación β_2 es menor que la velocidad de grupo del modo de propagación β_1 .
10. Un interferómetro que comprende el cristal fotonico según cualquiera de las reivindicaciones 2 a 9.
11. Uso del cristal fotónico según cualquiera de las reivindicaciones 2 a 9, o del interferómetro según la reivindicación 10, como modulador fotónico, como sensor de índice de refracción

para la detección de cambios en el índice bruto de una concentración de un compuesto entre muestras depositadas sobre dicho cristal fotónico o dicho interferómetro, respectivamente, o como sensor de detección de sustancias químicas o biológicas.

- 5 12. Método para la detección de una variación en una propiedad óptica de un objeto o entorno, usando el cristal fotónico según cualquier de las reivindicaciones 2 a 9 o el interferómetro según la reivindicación 10, donde dicho método comprende las siguientes etapas:
- 10 (i) medir un parámetro de la luz de salida del cristal fotónico o del interferómetro, respectivamente, al pasar luz de una longitud de onda (λ) por dicho cristal fotónico en un momento T_0 , cuando aún no se ha producido ninguna variación en dicha propiedad de dicho objeto o entorno;
- 15 (ii) medir un parámetro de la luz de salida del cristal fotónico o del interferómetro, respectivamente, en un momento T , cuando se haya producido una variación en dicha propiedad de dicho objeto o entorno;
- (iii) determinar si hay una diferencia entre los parámetros de los pasos (i) y (ii) donde, cuando se determina alguna diferencia, se determina que se ha producido una variación en dicha propiedad óptica de dicho objeto o entorno.
- 20 13. El método según la reivindicación 12, donde el parámetro de la luz de salida en los pasos (i) y (ii) es el rango espectral libre, medido como la distancia entre dos picos máximos o mínimos en el patrón de interferencias espectral a la salida del dispositivo, donde hay una diferencia entre los parámetros de los pasos (i) y (ii), cuando el desfase entre patrones de interferencias espectrales de los pasos (i) y (ii) es mayor que cero.
- 25 14. El método según cualquiera de las reivindicaciones 12 y 13, que comprende el paso adicional de determinar la influencia de dicha variación mediante la obtención de la relación que se produce entre la diferencia determinada en el paso (iii), con respecto al cambio en la propiedad óptica de dicho objeto o entorno.

Figura 1

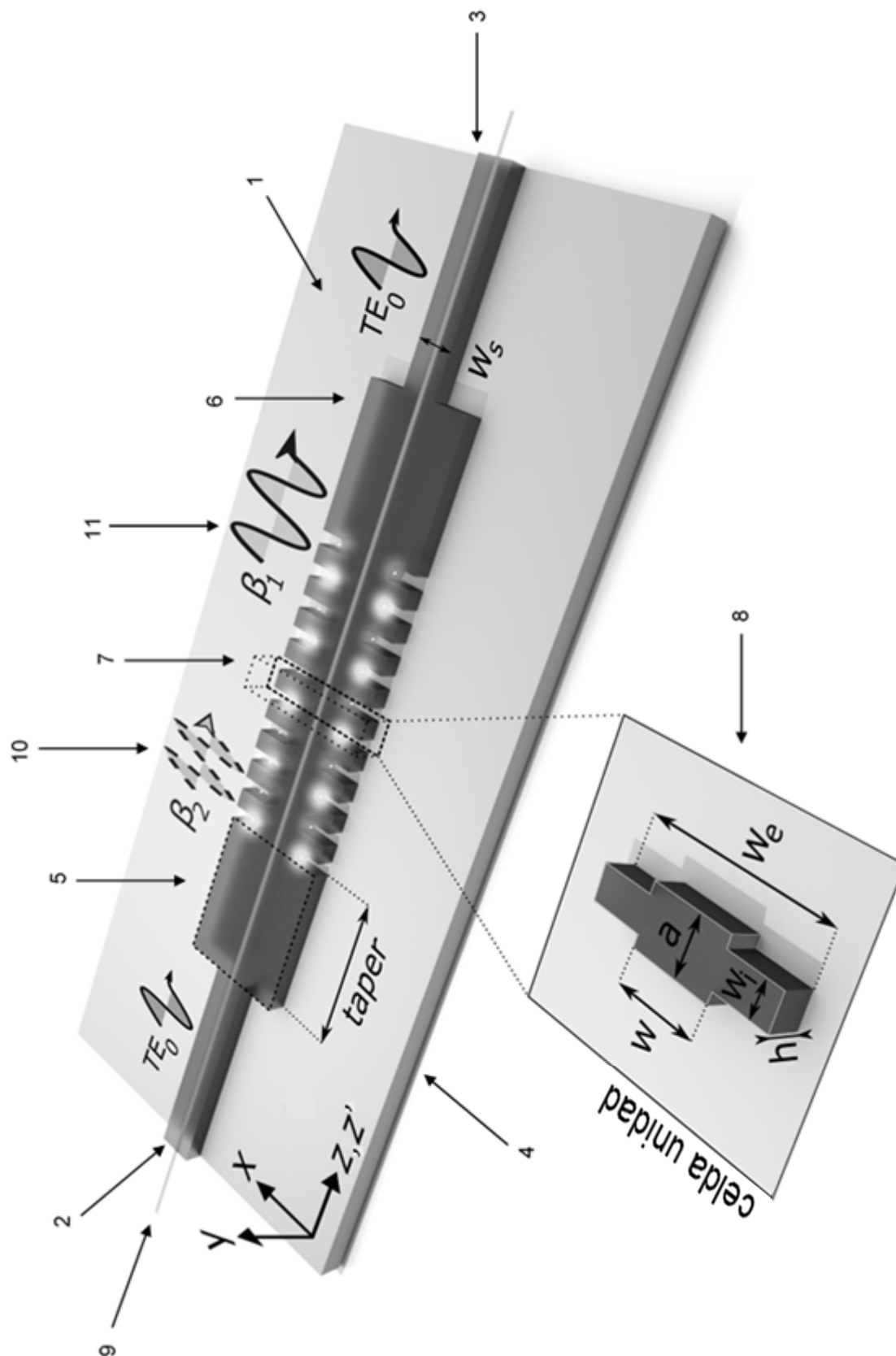


Figura 2

A.

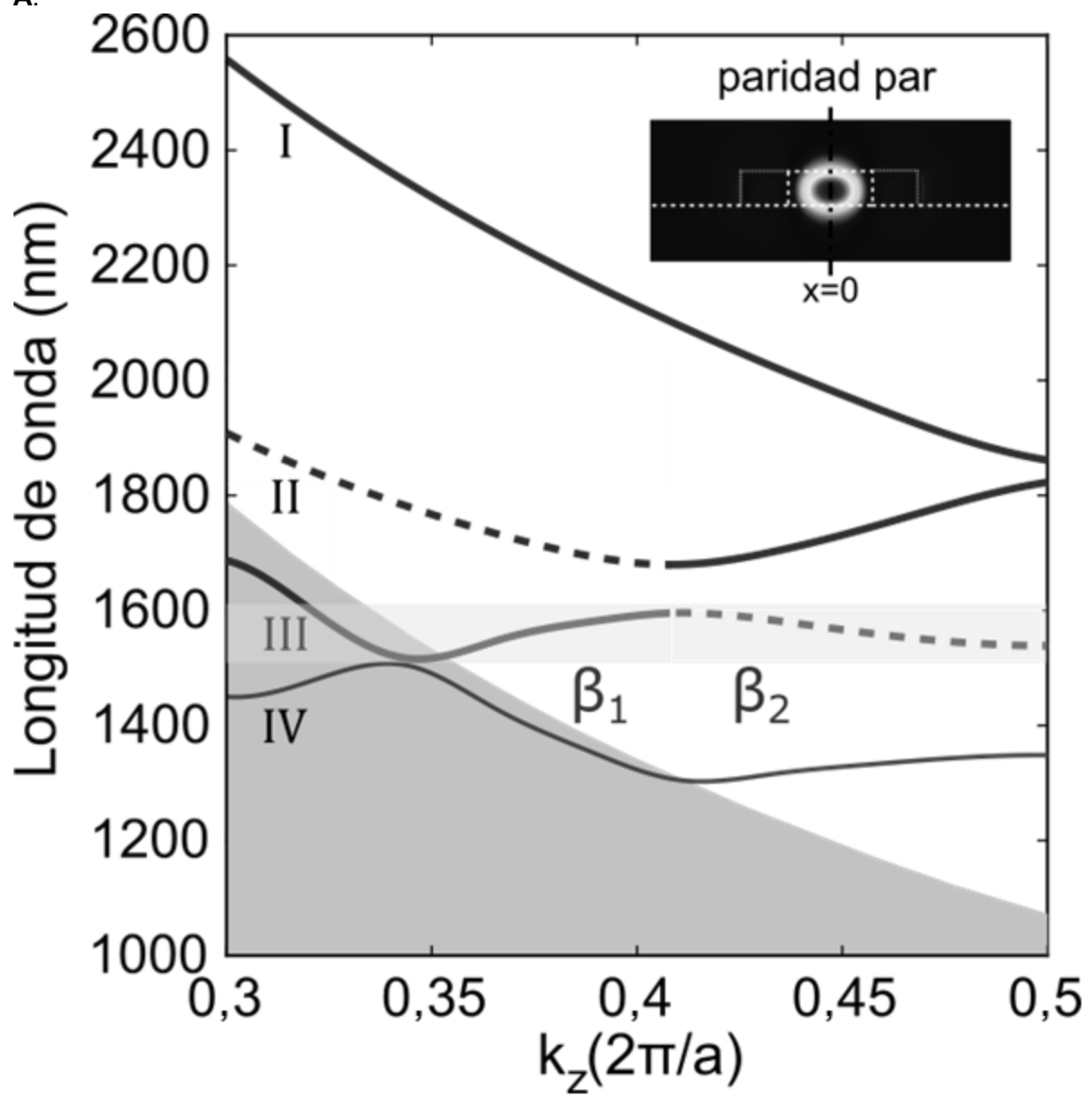
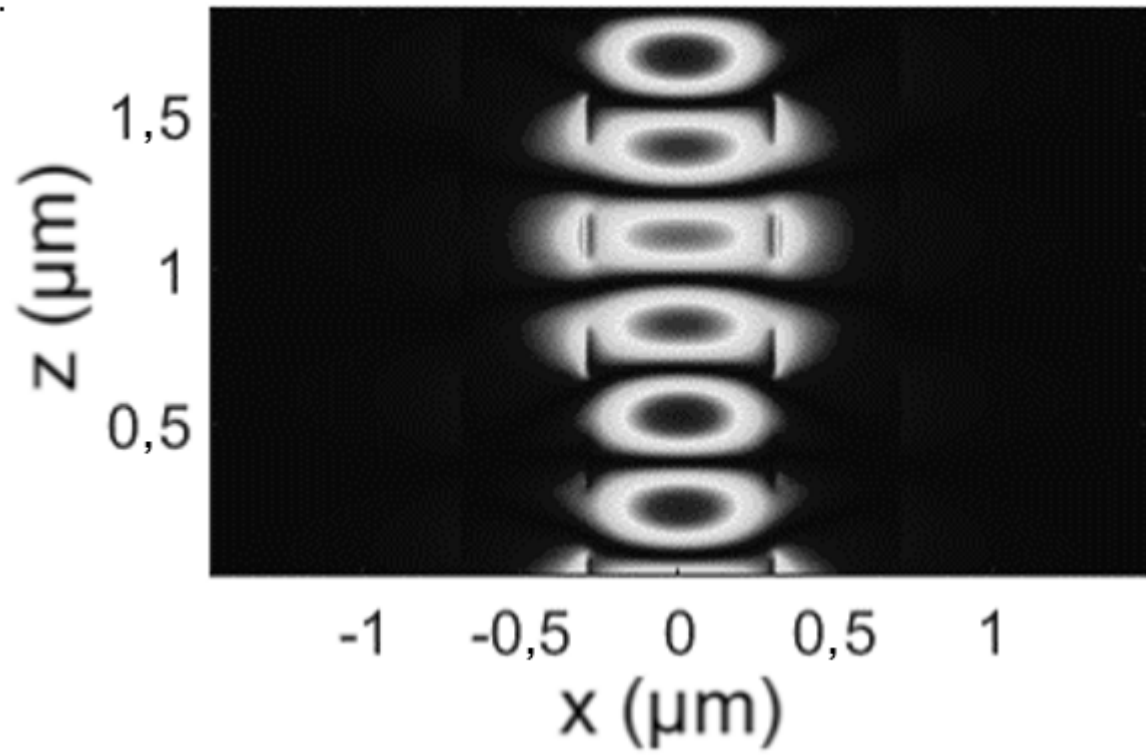


Figura 2 (continuación)

B.



C.

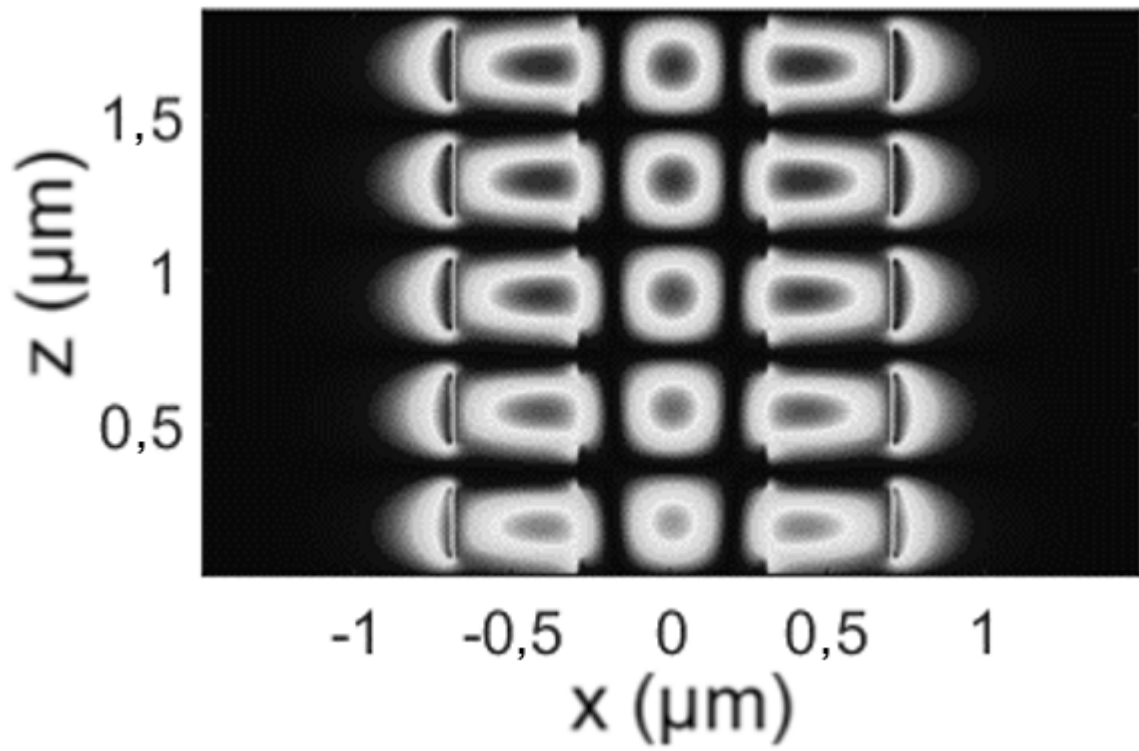


Figura 3

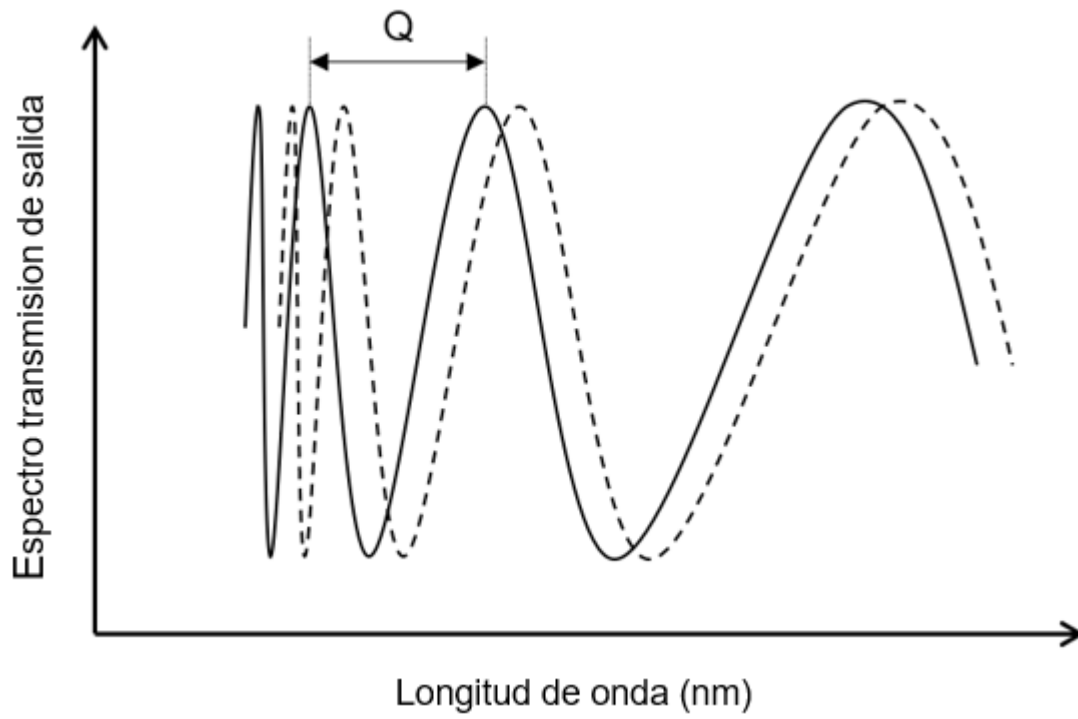


Figura 4

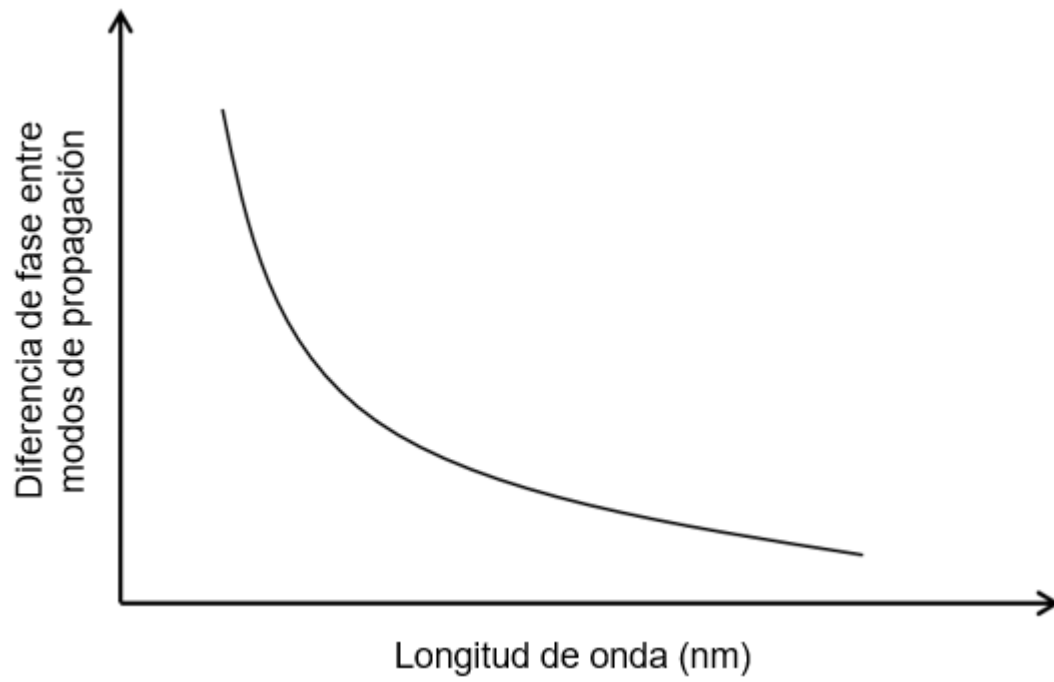


Figura 5

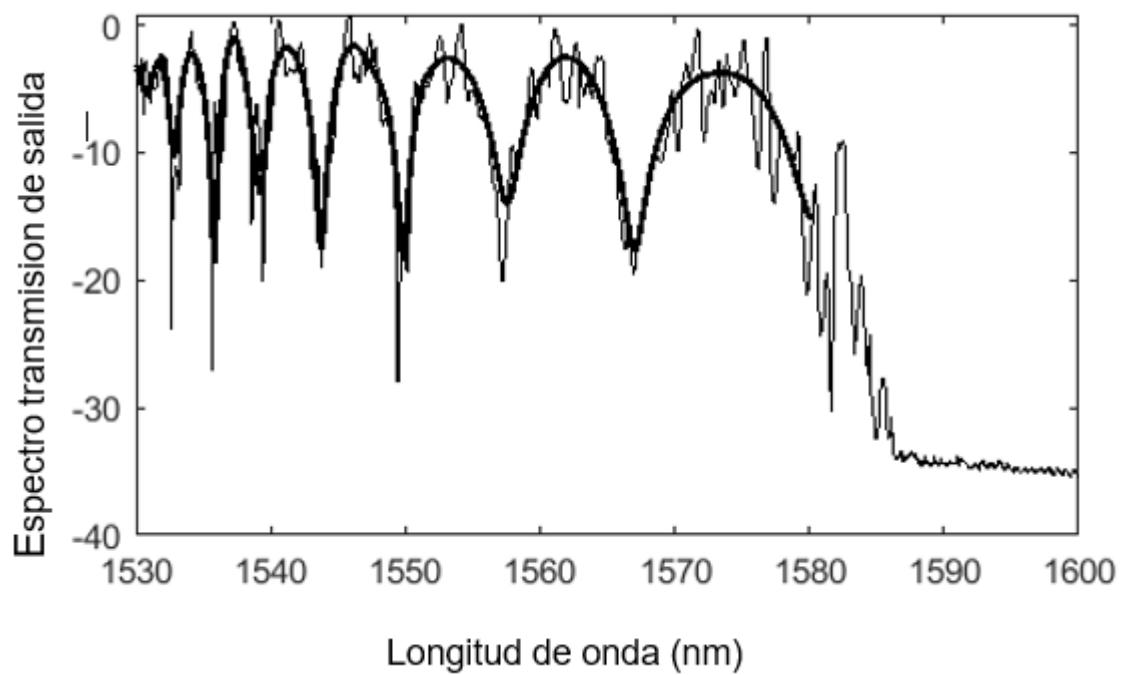


Figura 6

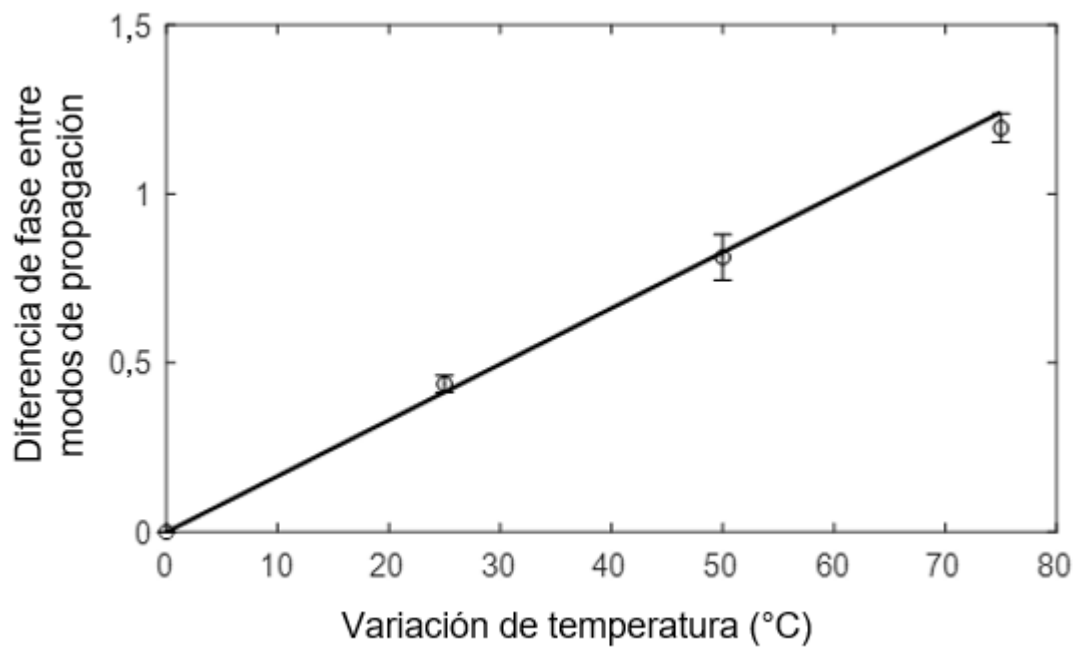
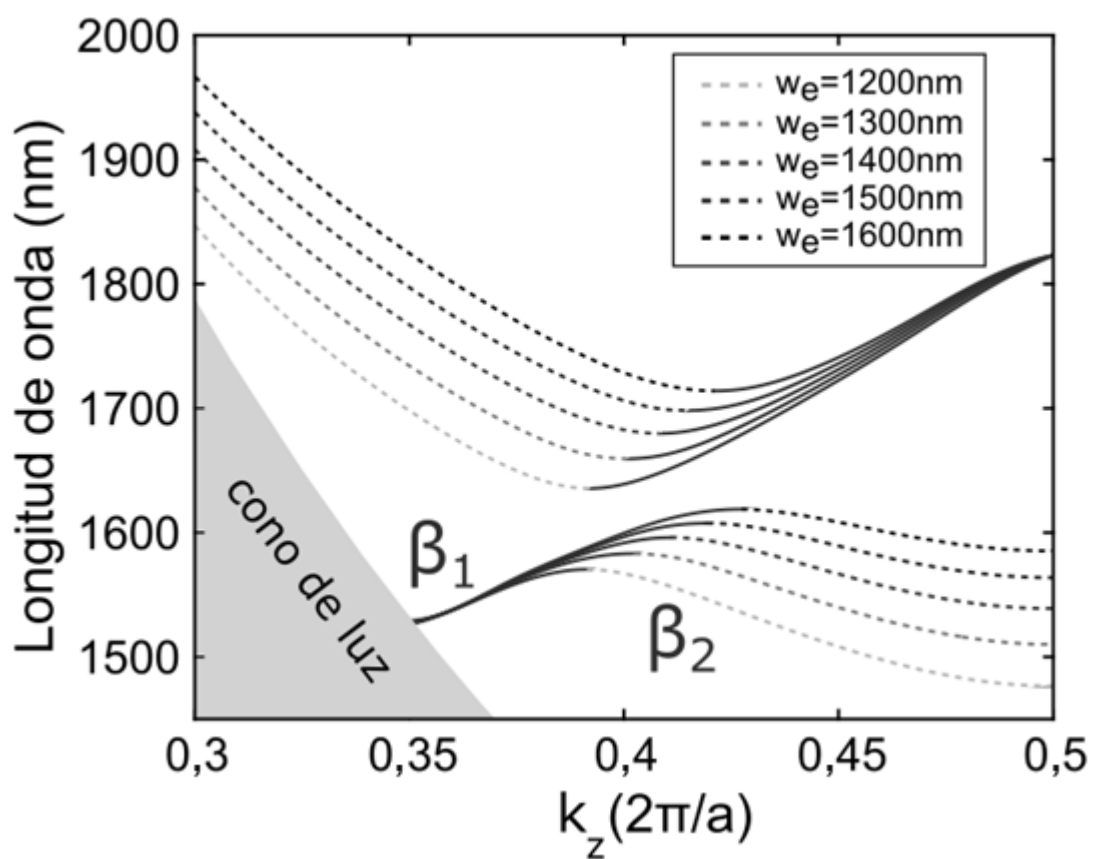


Figura 7

A.



B.

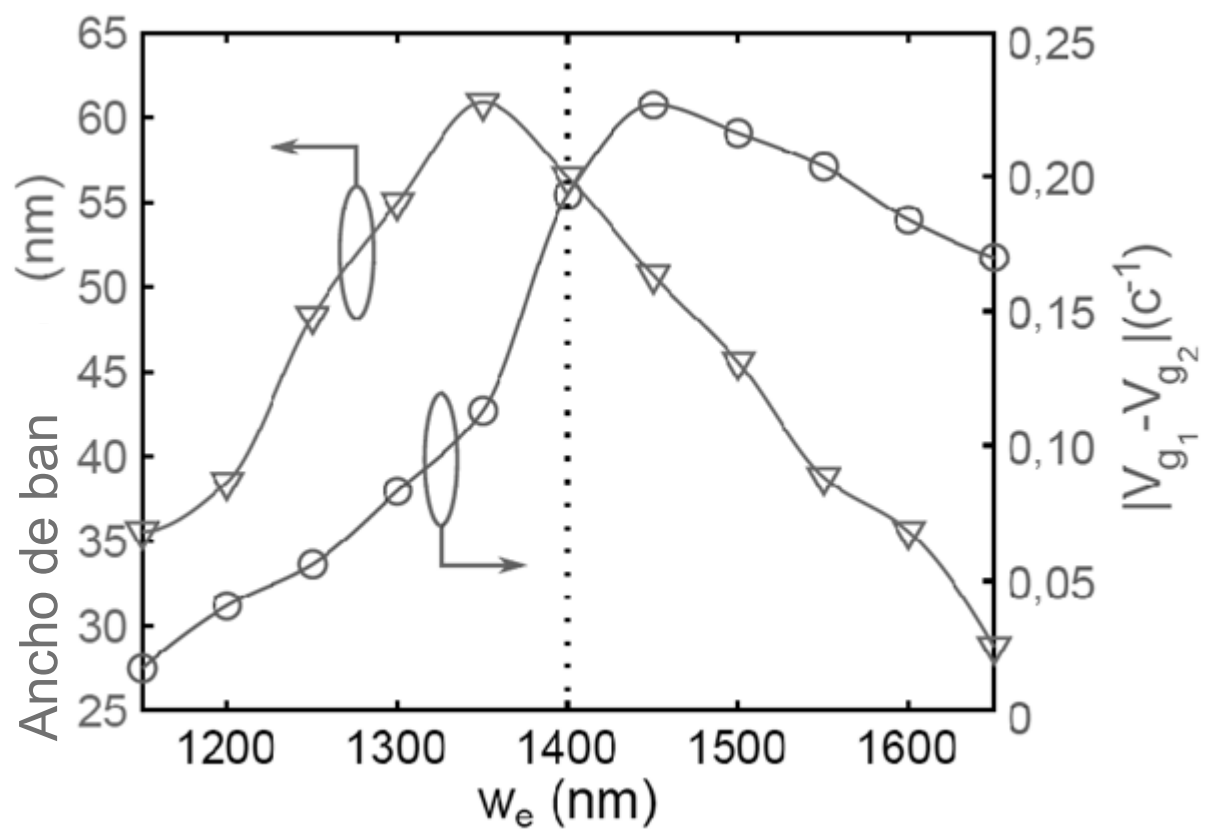


Figura 7 (continuación)

c.

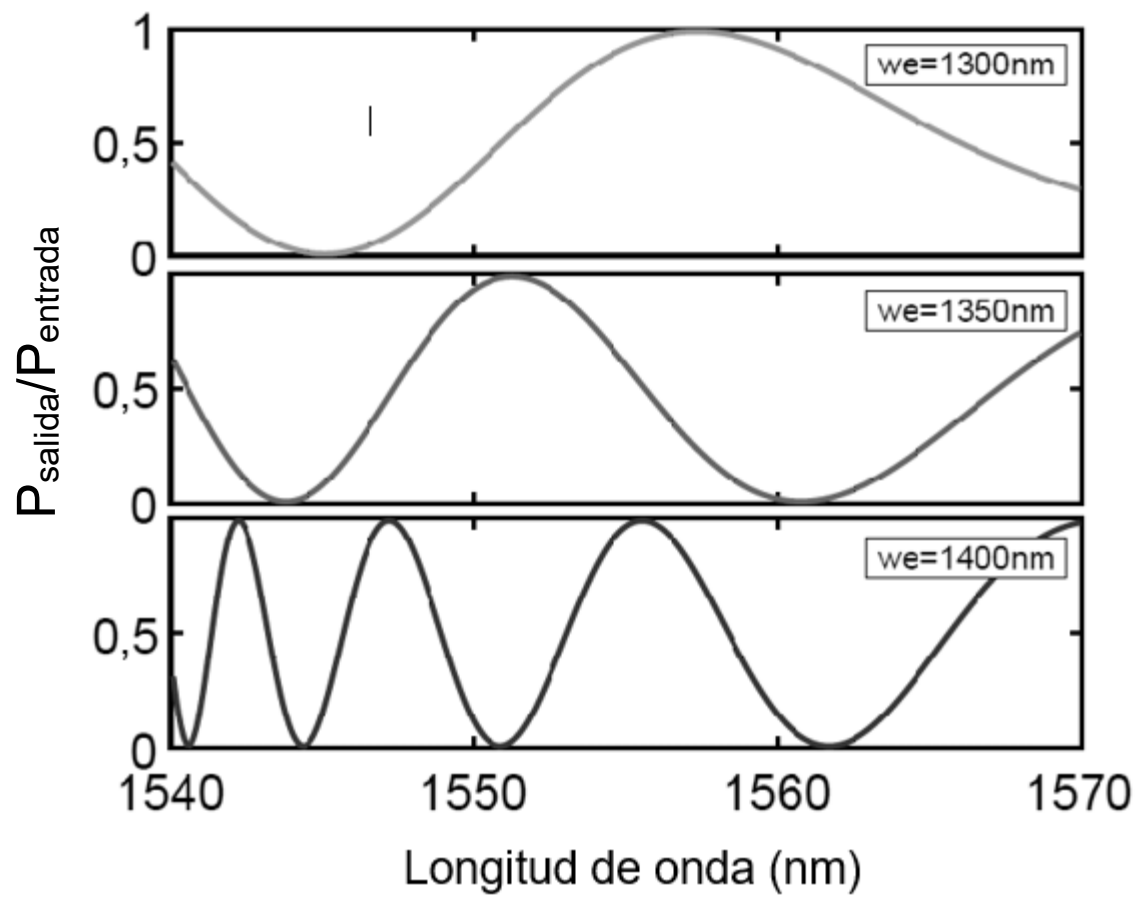
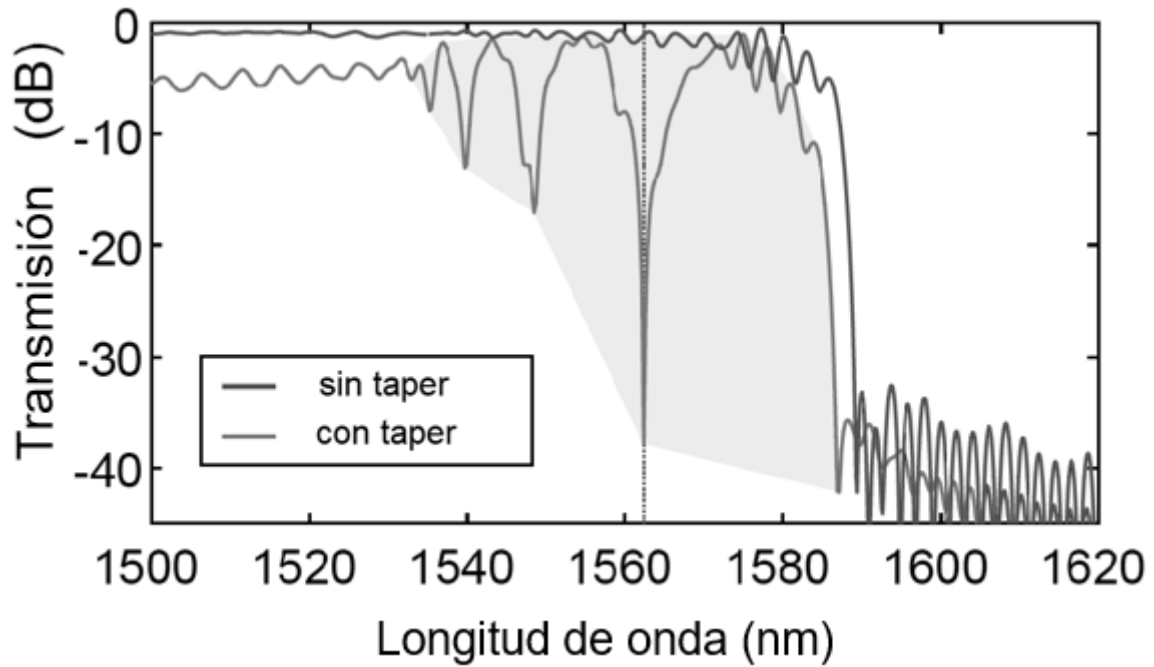


Figura 8

A



B.

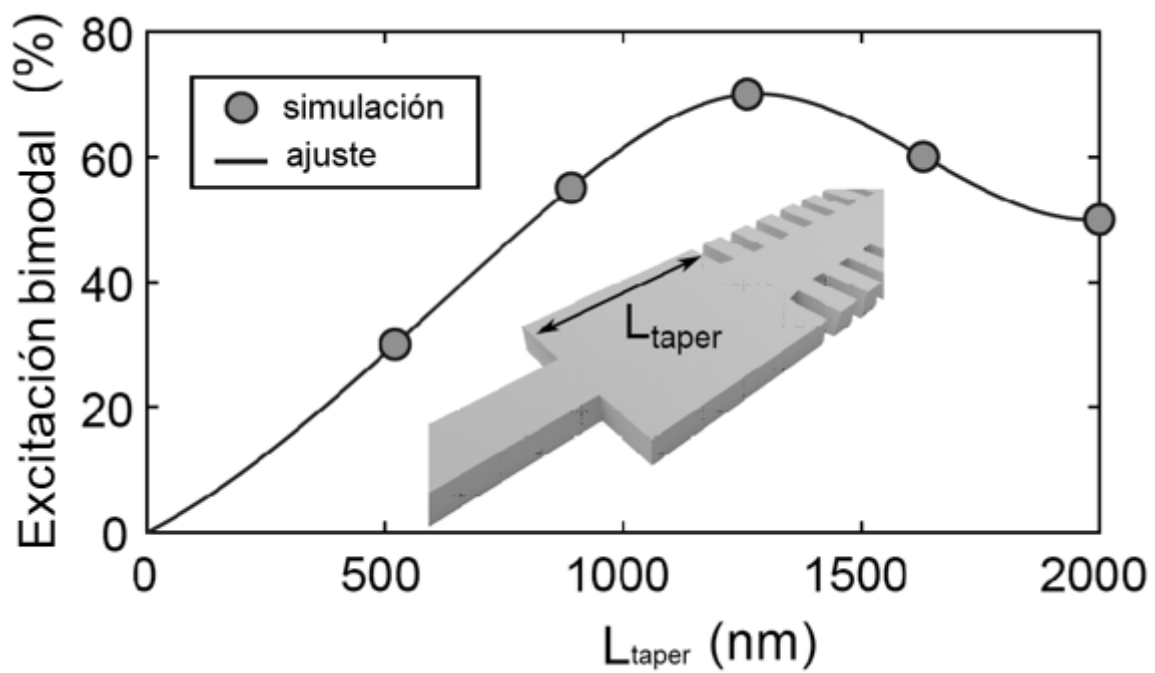
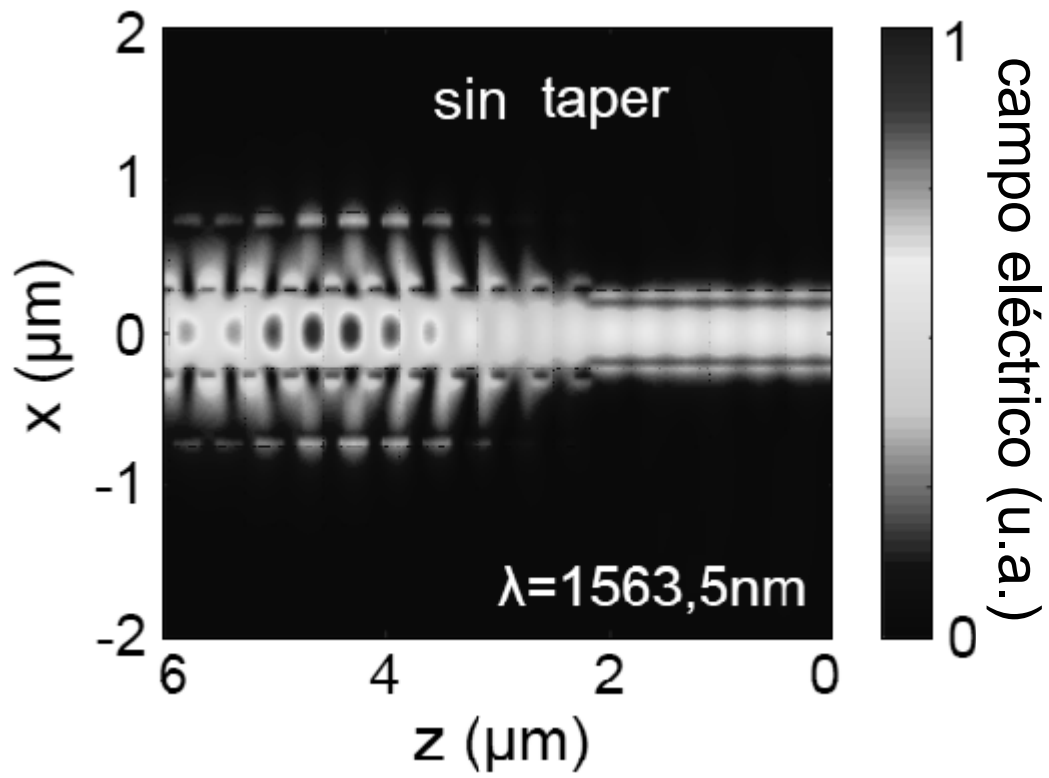


Figura 8 (continuación)

c.



d.

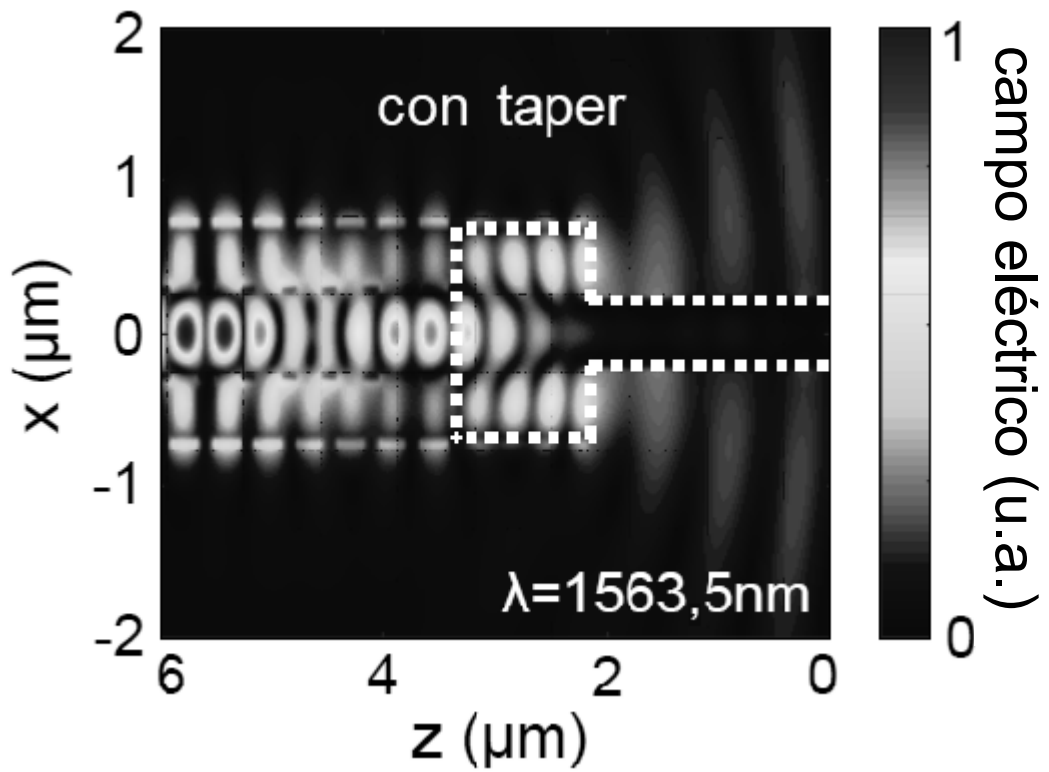


Figura 8 (continuación)

E.

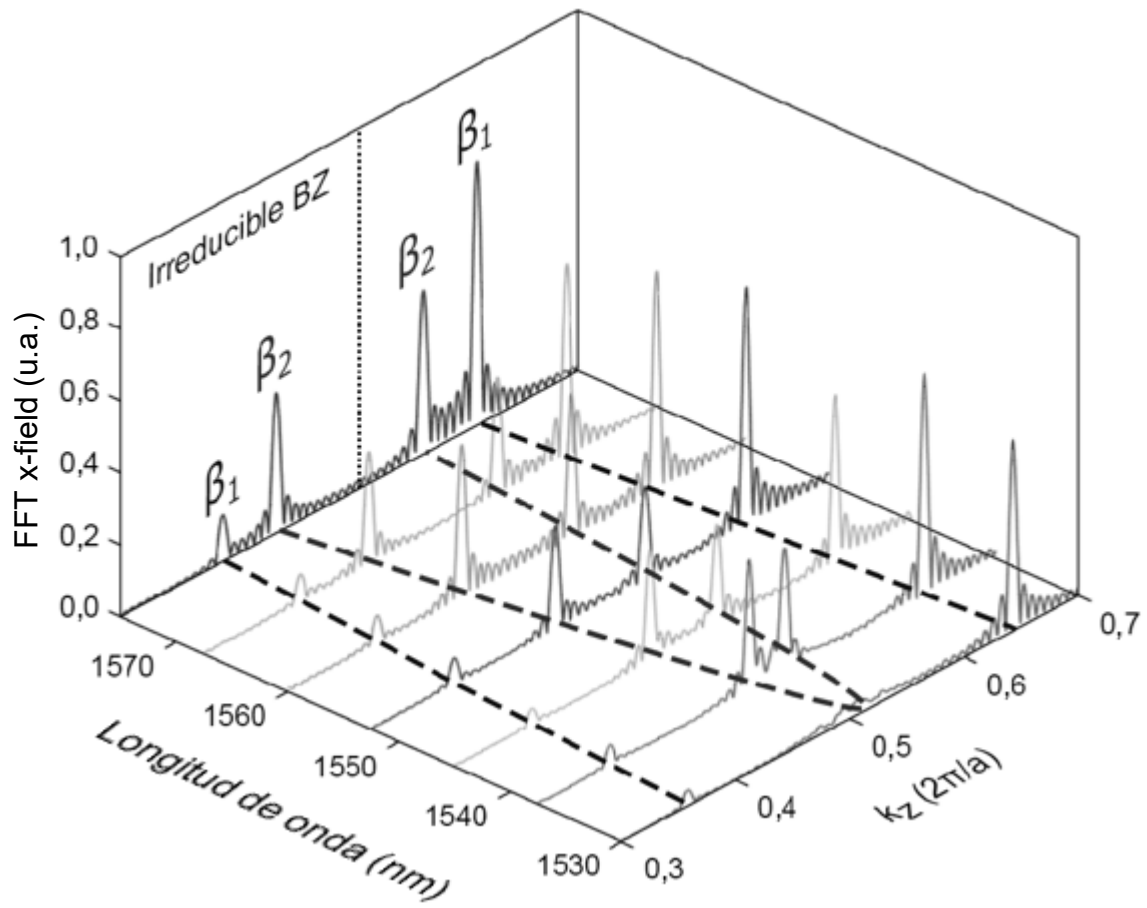
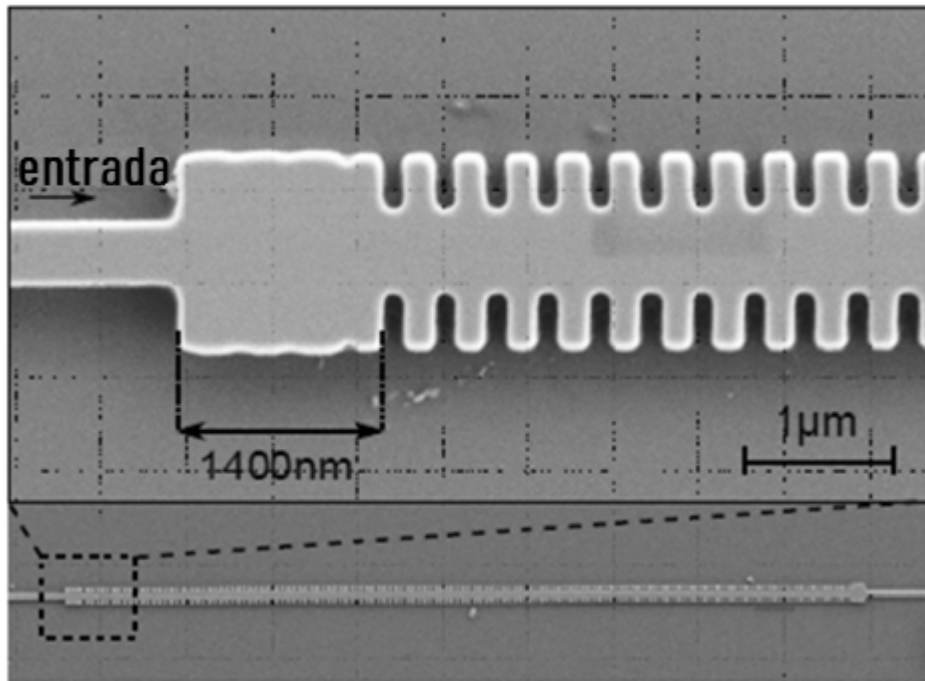


Figura 9

A.



B.

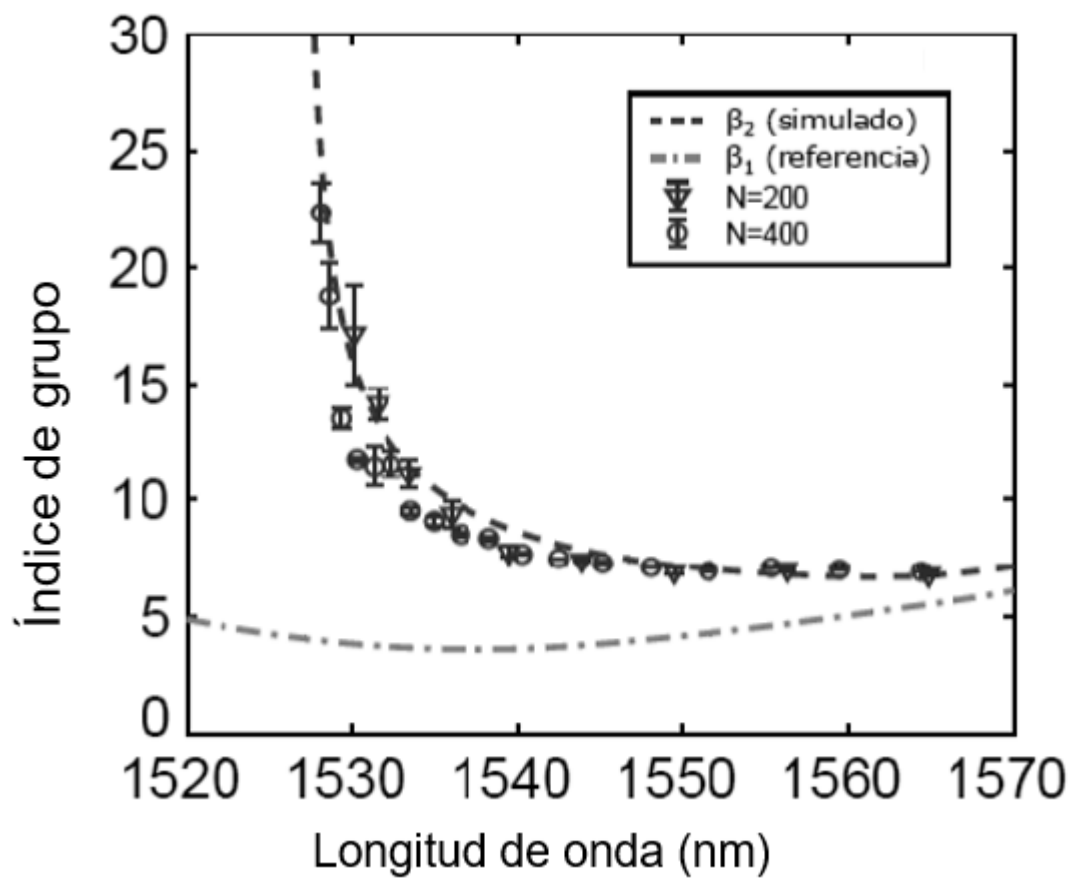


Figura 9 (continuación)

C.

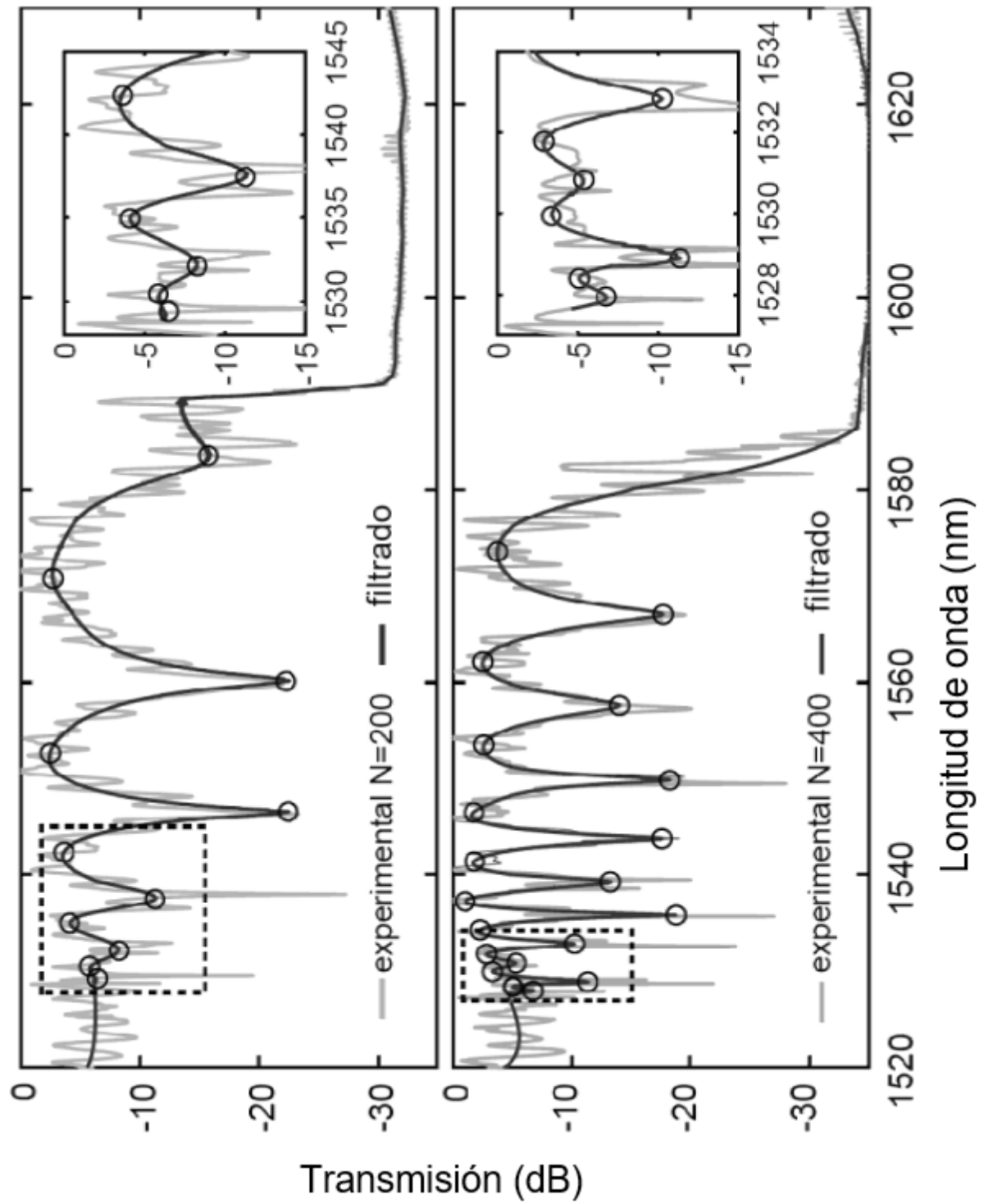
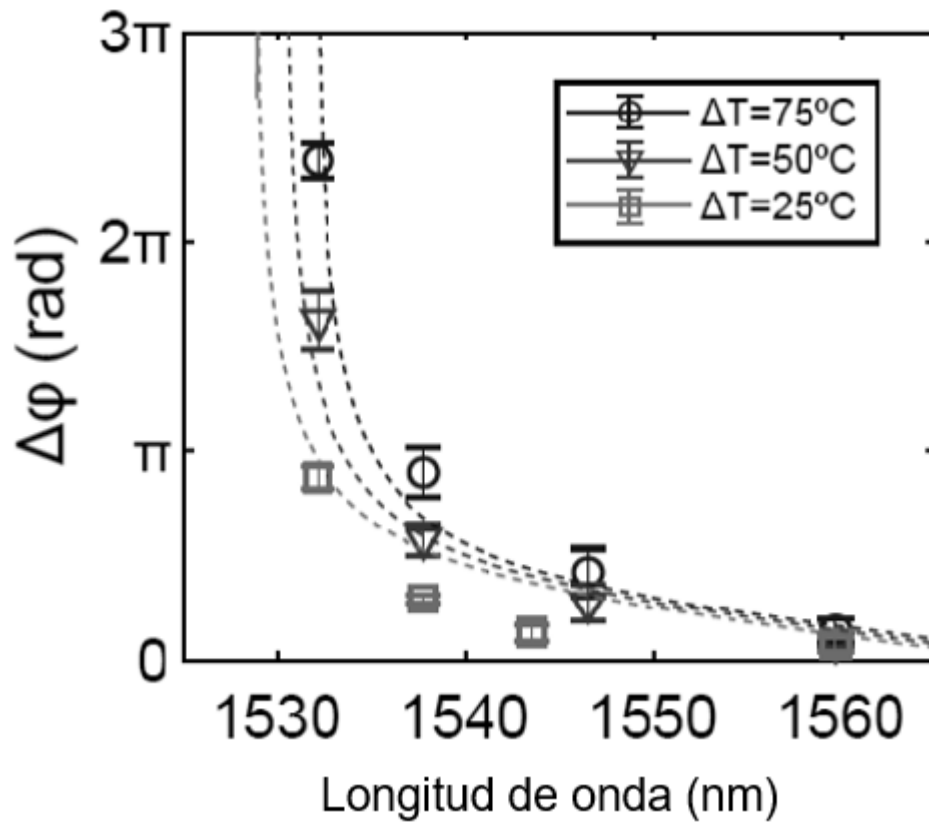


Figura 10

A.



B.

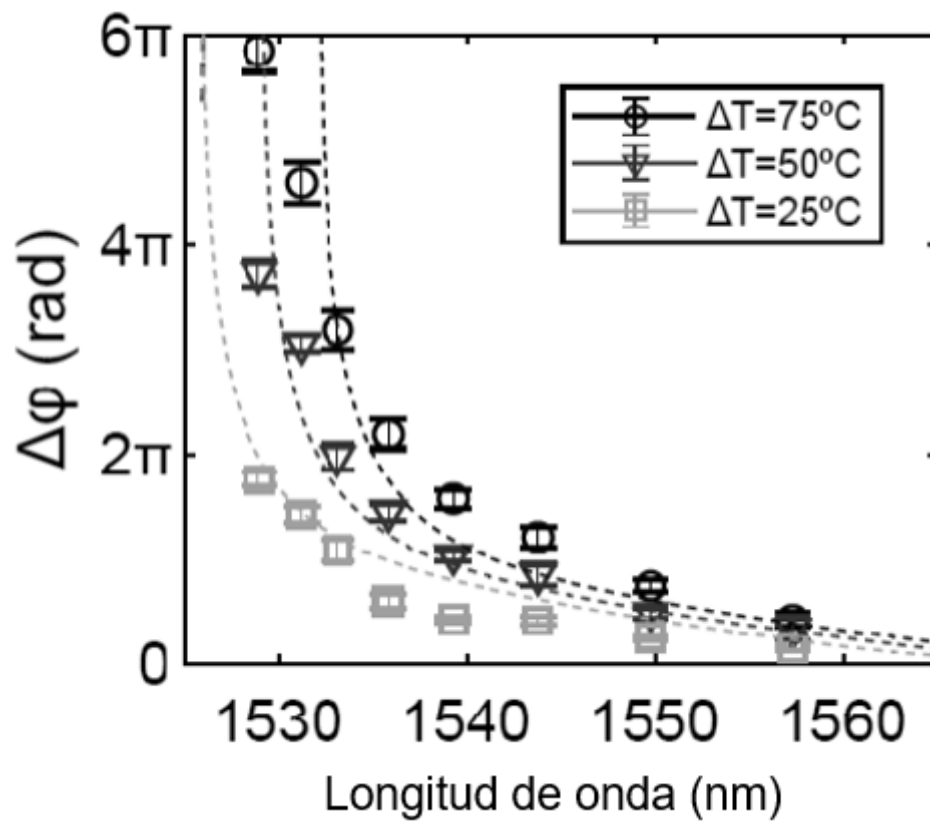
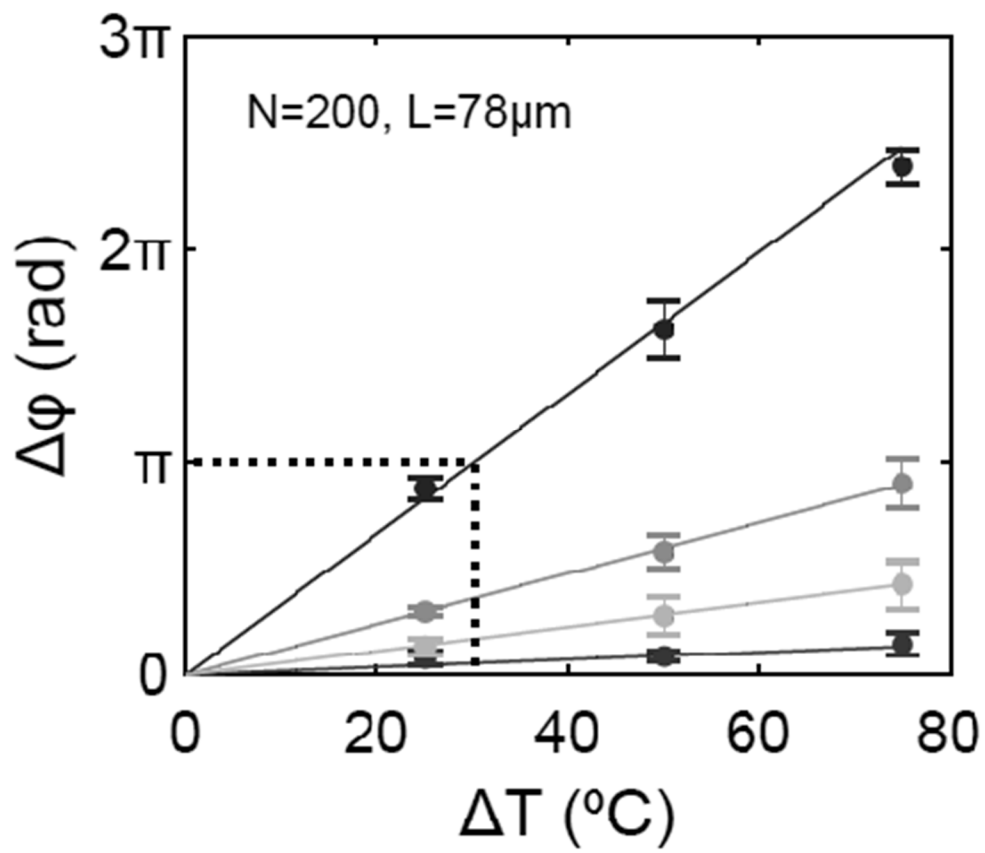


Figura 10 (continuación)

C.



D.

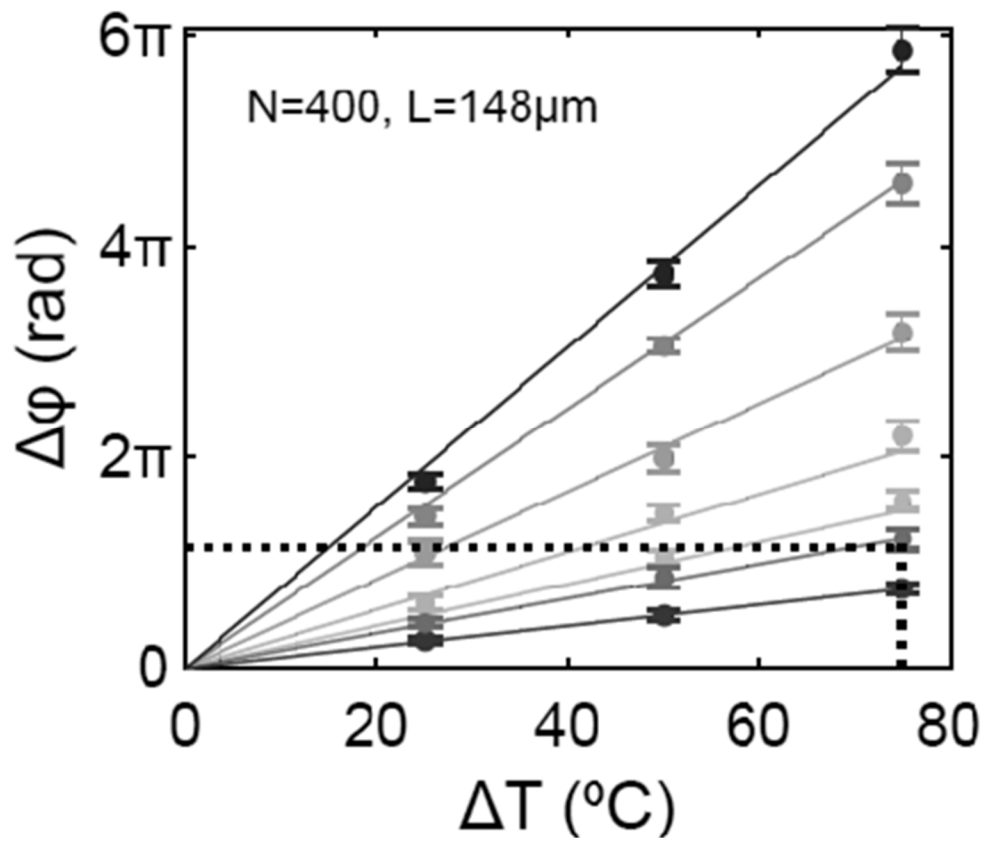
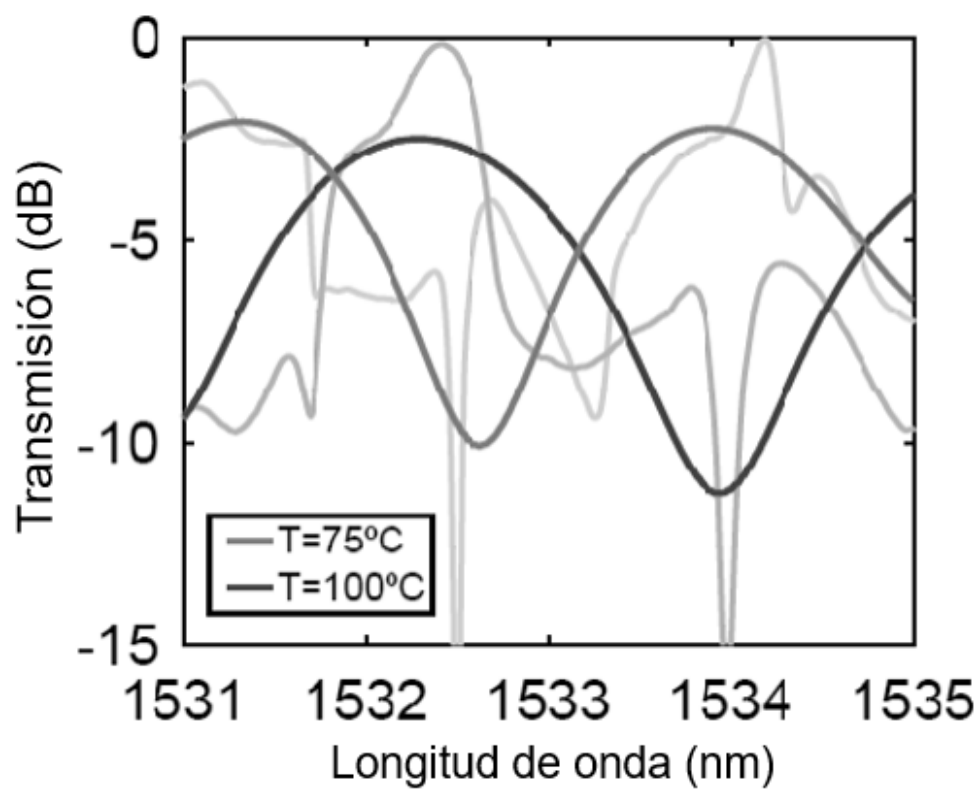


Figura 10 (continuación)

E.



F.

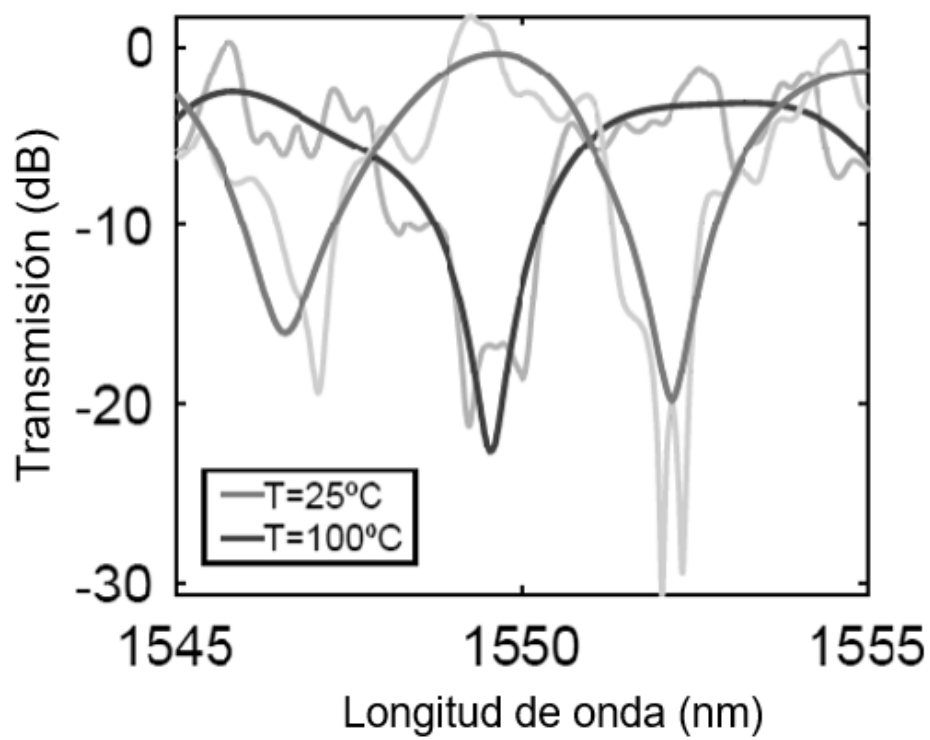
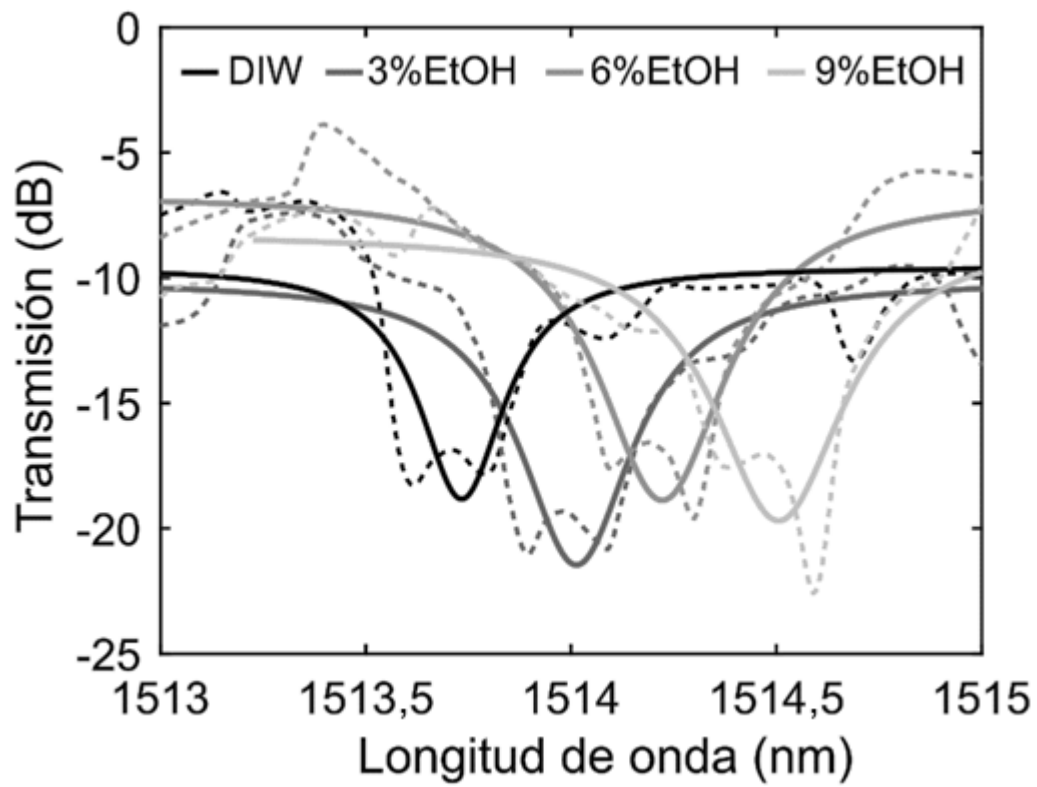


Figura 11

A.



B.

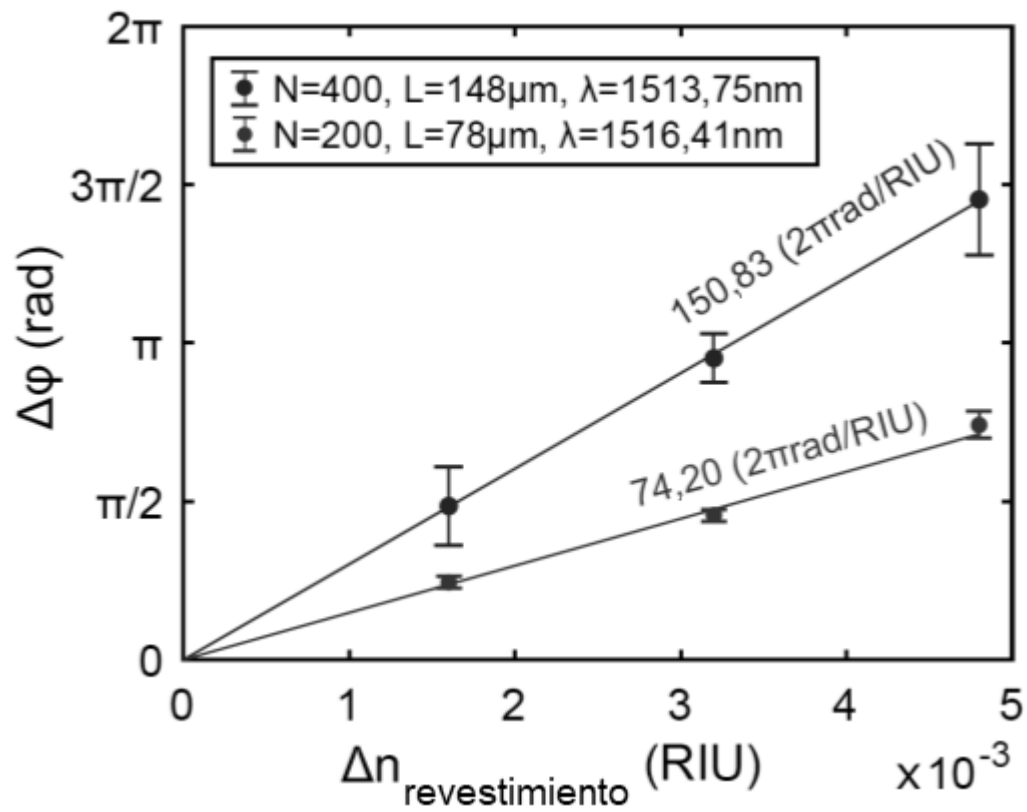


Figura 11 (continuación)

c.

