



Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**“DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN ÓPTICA DE UN MATERIAL FOTÓNICO FABRICADO
MEDIANTE HAZ ENFOCADO DE IONES”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIA DE MATERIALES

PRESENTA

M. C. VÍCTOR MANUEL CARRILLO VÁZQUEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. JOSÉ GUADALUPE MURILLO RAMÍREZ

CHIHUAHUA, CHIH.

AGOSTO 2014

INDICE

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
CAPITULO I: INTRODUCCION	5
i Antecedentes	5
ii Objetivos	7
iii Hipótesis	7
iv Justificación	8
iv Actividades particulares a desarrollar	8
CAPITULO II: CRISTALES FOTÓNICOS	9
II.1 Descripción del término “cristales fotónicos”	9
II.1.1 Funcionamiento de los cristales fotónicos	12
II.1.2 Cristal fotónico bidimensional	13
II.1.3 Cristal fotónico tridimensional	17
II.1.4 Cristales fotónicos en forma de placa	20
II.2 Aplicaciones de los cristales fotónicos	21
CAPITULO III: METODOS DE FABRICACION	25
III.1 Fabricación de cristales fotónicos bidimensionales	25
III.2 Fabricación de cristales fotónicos en forma de placa	31
III.3 Fabricación de cristales fotónicos tridimensionales	36
CAPITULO IV: TECNICAS EXPERIMENTALES	39
IV.1 Fabricación de los cristales fotónicos	40
IV.1.1 Fabricación de cristal fotónico de orificios cuadrados	40
IV.1.2 Fabricación de cristal fotónico de orificios circulares	49
IV.2 Caracterización óptica de los cristales fotónicos	51

CAPITULO V: RESULTADOS	55
V.1 Fabricación y caracterización estructural de los cristales fotónicos	55
V.2 Caracterización óptica de los cristales fotónicos	63
V.3 Discusión	67
CONCLUSIONES	71
REFERENCIAS	73

RESUMEN

Reportamos la fabricación y caracterización de hetero-estructuras fotónicas construidas en sustratos de silicio recubiertos con una película delgada de ZnO, utilizando la técnica de erosión por haz enfocado de iones. Se construyeron y analizaron tres estructuras fotónicas, una de ellas, la estructura de control, describiendo una red cuadrada regular con constante de red $a=1.05 \mu\text{m}$ y columnas de aire de $r=0.31a$. Las otras dos estructuras construidas definieron un arreglo similar de orificios de aire, incluyendo esta vez un patrón de micro-cavidades cuasi-circulares, embebidas en la red cuadrada circular con orificios de aire. El diámetro de estas cavidades fue un orden de magnitud mayor que el diámetro de los orificios la estructura de control, describiendo este arreglo otra red cuadrada. Una de las estructuras incluyó 16 micro-cavidades cuasi-circulares y la otra 36, variándose de esta forma la densidad de micro-cavidades dentro del cuerpo del cristal fotónico. Todas las hetero-estructuras construidas mostraron la capacidad de modular la reflectancia a incidencia normal, con respecto a la reflectancia de un sustrato uniforme de Si-ZnO. La inclusión de un patrón de micro-cavidades, embebido en las estructuras fotónicas, ayudó en la modulación de la reflectancia, induciendo un desplazamiento en su magnitud máxima hacia longitudes de onda específicas en la frontera de los rangos visible-infrarrojo cercano (VIS-NIR), del espectro electromagnético. Además, se observó que todas las estructuras fotónicas construidas y estudiadas en este trabajo, mostraron una sensibilidad significativa a la polarización de la luz. Estos resultados sugieren la factibilidad de emplear este tipo de estructuras fotónicas, en el desarrollo de espejos de alta reflectancia, funcionales en el rango de longitudes de onda en la frontera VIS-NIR, sensibles al estado de la polarización de la luz.

ABSTRACT

We report the fabrication and characterization of photonic hetero-structures built on silicon substrates coated with a ZnO thin film employing the focused ion beam milling technique. Three types of photonic devices were fabricated and analyzed, one of them being the reference control structure, describing a regular square lattice with a constant $a = 1.05 \mu\text{m}$ and air columns with radius $r = 0.31a$. The other two structures were built in a similar arrange of air holes but including now a pattern of embedded quasi-circular micro-cavities within the regular square lattice of air columns. The diameter of these micro-cavities was one order of magnitude larger than air holes in the reference control structure, describing another square lattice. One of the structures included 16 quasi-circular micro-cavities and the other one included 36, varying this way the micro-cavities density in the photonic crystal body. All hetero-structures built showed the property to modulate the reflectance at normal incidence regarding to the reflectance of a uniform Si-ZnO substrate. The inclusion of a pattern of embedded micro-cavities in the photonic structures helped in the modulation of reflectance inducing a shift of maximum magnitude to specific wavelengths in the border of visible-near infrared range (VIS-NIR) in the electromagnetic spectra. Furthermore, it was observed that all the photonic structures fabricated and studied in this work showed a significant sensibility to polarization of light. These results suggest the feasibility in use this kind of photonic structures in the development of high reflectivity mirrors functional for in the VIS-NIR range wavelengths sensitive to polarized state of light.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

i Antecedentes

El estudio de los materiales fotónicos comenzó en 1887, cuando el físico inglés Lord Rayleigh realizó experimentos con apilamientos en forma de multicapas de placas dieléctricas. En su trabajo experimental, encontró que estos materiales inhiben la propagación de la luz en una dimensión en un intervalo de longitudes de onda, mejor conocido hoy en día como brecha fotónica o “band-gap” fotónico. El interés por el estudio de estos materiales volvió a surgir hasta finales del siglo XX, con el estudio de estructuras fotónicas, cuyos “band-gaps” fotónicos están presentes en 2 y 3 dimensiones. Desde entonces, se han desarrollado diversos estudios en torno a materiales fotónicos, ya que sus propiedades ópticas ofrecen soluciones alternativas a una gran variedad de desafíos tecnológicos actuales en la iluminación de estado sólido, en el área de celdas solares y en el campo de las telecomunicaciones, entre otros campos de estudio de interés.

En el presente trabajo de tesis, se realizó un estudio que consistió en la fabricación y caracterización estructural y óptica de hetero-estructuras fotónicas, construidas en un sustrato de silicio (Si), recubierto con una película delgada de óxido de zinc (ZnO). Así mismo, se desarrolló el estudio de la influencia de una red de micro-cavidades ópticas en la reflectancia del material, cuando éstas se encuentran embebidas en la estructura fotónica.

Para ofrecer una idea general del trabajo desarrollado, se presenta una breve reseña a continuación:

En el capítulo dos se define qué es un cristal fotónico, la clasificación de cristales fotónicos y la descripción de la brecha fotónica. También se enlistan algunas de las aplicaciones tecnológicas de estos materiales. En el tercer capítulo, se describen los métodos y equipos más comunes utilizados para la fabricación de estos materiales de acuerdo a su tipo. El cuarto capítulo muestra el método de fabricación de cristales fotónicos que se empleó en este trabajo, así como los materiales utilizados para su fabricación. Además, se describe la experimentación para la caracterización óptica de las estructuras construidas. En el quinto capítulo se presentan las estructuras fotónicas construidas, así como los resultados de su caracterización estructural y óptica.

Para finalizar, se presentan las conclusiones este trabajo de investigación sobre la caracterización estructural y óptica de las estructuras fotónicas bidimensionales construidas.

ii Objetivos

Objetivo general

- Modular la reflectancia óptica de un sustrato de silicio en la región del IR cercano del espectro electromagnético, mediante la construcción de una estructura fotónica bidimensional sobre su superficie.

Objetivos particulares

- Determinar la influencia de una película delgada de ZnO en la reflectancia óptica de un cristal fotónico bidimensional, fabricado en un sustrato de silicio.
- Modular la reflectancia óptica en un cristal fotónico bidimensional al agregar micro-cavidades ópticas, embebidas de forma periódica en su estructura.

iii Hipótesis

- Es posible fabricar cristales fotónicos bidimensionales con dimensiones de algunos cientos de nanómetros, mediante la técnica de micro-maquinado por medio de haz enfocado de iones (FIB), utilizando el equipo JEOL JEM9320-FIB del Laboratorio Nacional de Nanotecnología en CIMAV.
- Es factible modular de forma selectiva la reflectancia del silicio, mediante el maquinado de un cristal fotónico bidimensional en su superficie, donde se incluyen micro-cavidades ópticas embebidas, en la red con el fin de introducir bandas fotónicas en la estructura.

iv. Justificación

- Existe un área de oportunidad en el estudio de las propiedades ópticas de los cristales fotónicos, debido a que es una rama de investigación en crecimiento que puede aportar grandes avances tecnológicos en aplicaciones comerciales. De estas aplicaciones se pueden destacar dispositivos de gran utilidad en el área de las telecomunicaciones, así como el desarrollo de materiales inteligentes utilizados en el control de transmisión y reflexión de irradiación solar, por mencionar solo algunas.

v. Actividades particulares a desarrollar

- Diseño y fabricación de cristales fotónicos utilizando el equipo de haz enfocado de iones JEM 9320FIB de CIMAV, para fabricar estructuras fotónicas con dimensiones comparables a las reportadas en la literatura actual.
- Fabricación de cristales fotónicos en un sustrato de silicio, recubierto con una película delgada de ZnO, con un diseño de red cuadrada con orificios circulares.
- Fabricación de cristales fotónicos con micro-cavidades periódicas, embebidas en la red de la estructura fotónica, con densidades de 16 y 36 cavidades.
- Caracterización óptica de las estructuras fotónicas fabricadas, para determinar la influencia de la película de ZnO y de las micro-cavidades ópticas en la reflectancia en los cristales fotónicos.

CAPITULO II

CRISTALES FOTÓNICOS

II.1 Descripción del término “cristales fotónicos”

Un cristal fotónico es un material que presenta una modulación periódica del índice de refracción, inducido mediante la inclusión de defectos estructurales. El propósito de este tipo de materiales, es controlar la reflexión y la transmisión de la luz a través de su estructura, mediante el fenómeno de difracción.

Estos cristales están presentes de forma natural y son responsables del color iridiscente en la piedra de ópalo, de la coloración en las plumas del pavorreal y de algunas mariposas [1].

El interés en los cristales fotónicos puede atribuirse a las publicaciones de Eli Yablonovitch [2] y Sajeev John [3], quienes buscaron demostrar experimentalmente la existencia de regiones prohibidas de propagación de una onda electromagnética, en un rango de frecuencias específicas (band-gap). Los primeros experimentos se realizaron en una red cúbica centrada en las caras (FCC) de gran escala (frecuencias de microondas), midiendo el espectro de transmisión en varios ángulos con la esperanza de observar un band-gap fotónico completo, i.e. en las tres dimensiones.

Desafortunadamente, no se encontró lo que se buscaba. Finalmente, Yablonovitch *et al*, propusieron fabricar una estructura de diamante perforando orificios cilíndricos en un material dieléctrico. La nueva estructura mostró un “band-gap” completo que concordó con los cálculos teóricos realizados [4]. Estos hallazgos motivaron a un gran número de investigadores a estudiar este fenómeno con mayor profundidad, no sólo en estructuras como las mencionadas anteriormente, sino en estructuras más sencillas en una y dos dimensiones [5]. La Figura 1 ilustra las estructuras FCC y FCC invertida, así como sus respectivas bandas fotónicas obtenidas teóricamente [6].

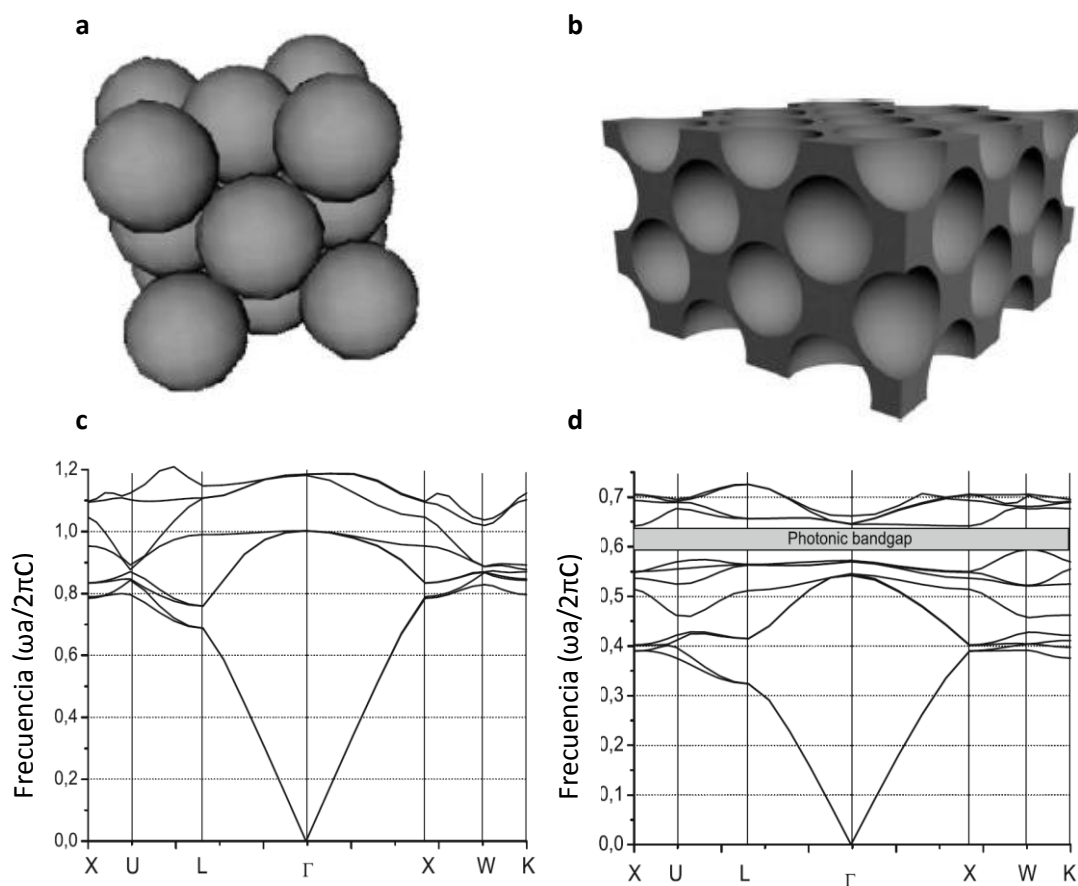


Figura 1. a). Cristal fotónico 3D con red FCC, b). Cristal Fotónico 3D con red FCC invertida, c). Estructura de bandas fotónicas de cristal fotónico 3D con red FCC, d). Estructura de bandas fotónicas de cristal fotónicos con red FCC invertida.

Debido a los efectos que se han observado en los cristales fotónicos, estos presentan una fuerte analogía con la física del estado sólido, es decir, a la estructura periódica atómica en una red cristalina. Gracias a esta similitud es posible realizar el análisis de estos cristales mediante métodos conocidos, así como emplear modelación numérica que se utiliza para el estado sólido. Las similitudes que se pueden destacar como las más importantes son:

- La modulación periódica del índice de refracción en un cristal fotónico forma una red, similar a la red atómica en el estado sólido.
- El comportamiento de los fotones en el cristal fotónico es similar al comportamiento de los electrones y huecos en una red atómica.
- Gracias a la periodicidad de la red, tanto el cristal fotónico como el cristal en estado sólido son capaces de proveer bandas de propagación prohibidas (band-gap).

Así mismo, existen algunas diferencias de gran relevancia entre ellos, que son: la distribución de energía por partícula en el caso de los electrones obedece la distribución de Fermi-Dirac mientras que los fotones la distribución de Bose-Einstein. Además, los electrones se ven afectados por el campo intra-cristalino, mientras que los fotones no experimentan ningún efecto por este campo, lo que hace que la modelación de la estructura de bandas fotónicas se vea simplificada significativamente [7].

Para fines de estudio, los cristales fotónicos se dividen en tres categorías: unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D), como se ilustra en la Figura 2. En este reporte sólo se discuten los cristales 2D y 3D debido a que los 1D han sido ampliamente estudiados como apilamientos dieléctricos.



Figura 2. Ejemplos de cristales fotónicos a) unidimensional -1D, b) bidimensional -2D y c) tridimensional -3D.

II.1.1 Funcionamiento de los cristales fotónicos.

En la Figura 3 se describe el funcionamiento de los cristales fotónicos 2D, donde se puede observar el fenómeno de la difracción que ocurre cuando un haz de luz, descrito por una onda plana, interacciona con un pilar dieléctrico. En un cristal fotónico bidimensional como el de la Figura 3, existe un arreglo periódico de pilares dieléctricos de ϵ_1 embebido en una matriz dieléctrica ϵ_2 . Cuando la luz incidente interacciona con el arreglo de pilares dieléctricos, ésta se difracta y todos los frentes de onda difractados producen una interferencia constructiva y destructiva, dentro del cristal fotónico para las diferentes longitudes de onda. De esta forma, algunas longitudes de onda pueden propagarse a través del cristal fotónico en direcciones de propagación específicas, debido a la interferencia constructiva, mientras que otras longitudes de onda no logran hacerlo debido a la interferencia destructiva, producida por la difracción.

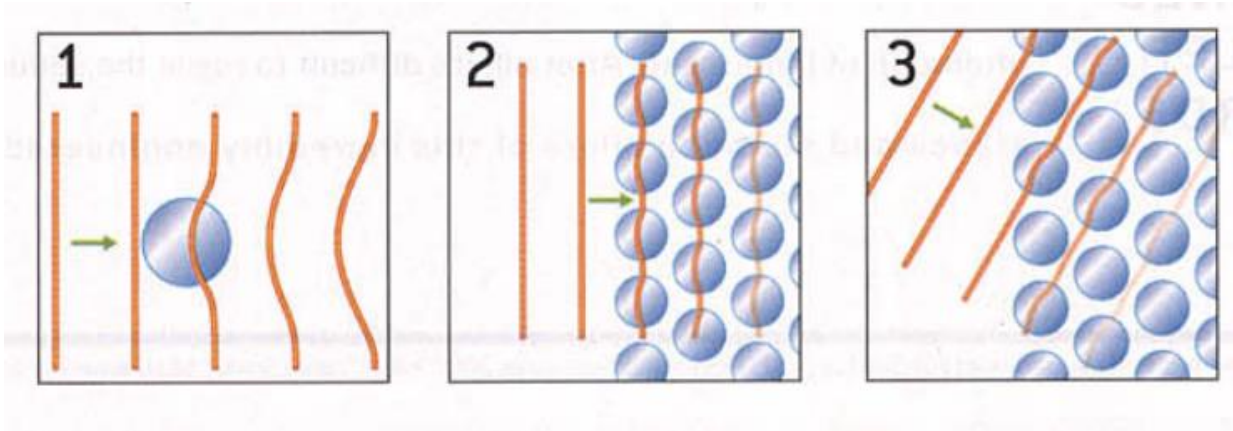


Figura 3. Haz de luz incidiendo en un apilamiento de materiales dieléctricos.

II.1.2 Cristal fotónico bidimensional.

Por su parte, la estructura de los cristales fotónicos 2D muestra que la función dieléctrica es periódica en dos direcciones (x,y), mientras que en la otra (z) permanece constante. Esto hace que los métodos de análisis y cálculo sean más complejos. Una estructura clásica es una red cuadrada de columnas dieléctricas suspendidas en aire, como lo muestra la Figura 4. Las columnas se deben imaginar de altura infinita ya que el caso de los cristales fotónicos 2D de altura finita se discuten en la sección 3.4. Estos cristales pueden tener un gap fotónico en el plano de propagación xy , donde no existen modos permitidos (frecuencias del espectro electromagnético). Así, si un haz de luz cumple con el rango de frecuencias del gap y se propaga dentro del plano, éste será reflejado.

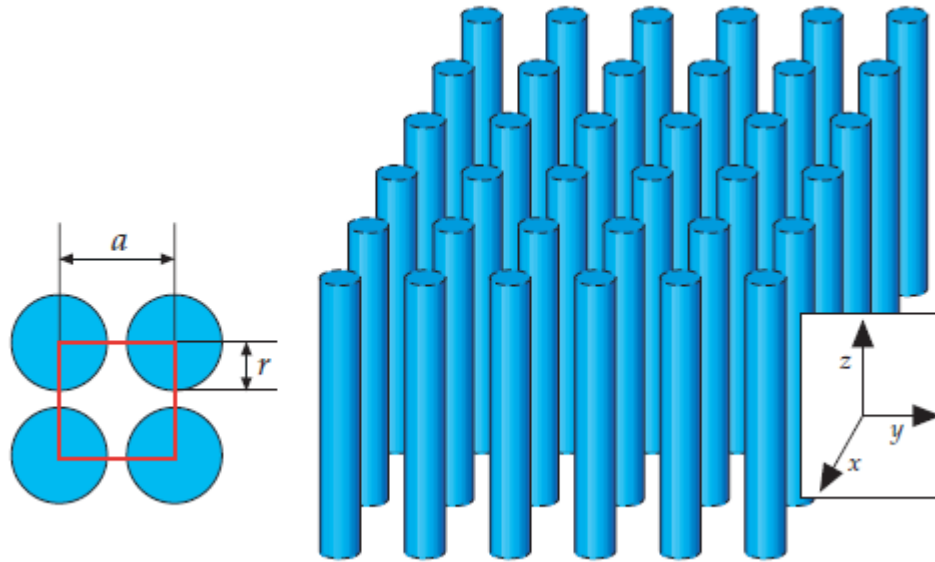


Figura 4. Cristal fotónico bidimensional con red cuadrada de columnas dieléctricas de radio r . El material es homogéneo en la dirección z y periódico en las direcciones x y y con constante de red a .

La polarización de la luz tiene una contribución importante en la presencia de “band gaps” fotónicos en estos cristales. Al considerar un haz de luz que se propaga en un medio que es periódico en dos dimensiones, éste observará contrastes en el índice de refracción, de acuerdo a la polarización con la que se propague dentro del medio. Debido a este fenómeno, es conveniente separar la polarización en Transversal Eléctrica TE (las componentes de campo H_z , E_x y E_y son diferentes de cero) y Transversal Magnética TM (las componentes del campo E_z , H_x y H_y son diferentes de cero), para tener un mejor entendimiento del mecanismo de funcionamiento de los cristales fotónicos. Tomando esta consideración, se obtiene una estructura de bandas fotónicas para cada polarización como lo muestra la Figura 5 [9]. En esta figura, las letras griegas Γ - X - M - Γ representan los puntos de alta simetría que describen las direcciones de propagación en la red recíproca, delimitando la zona de Brillouin.

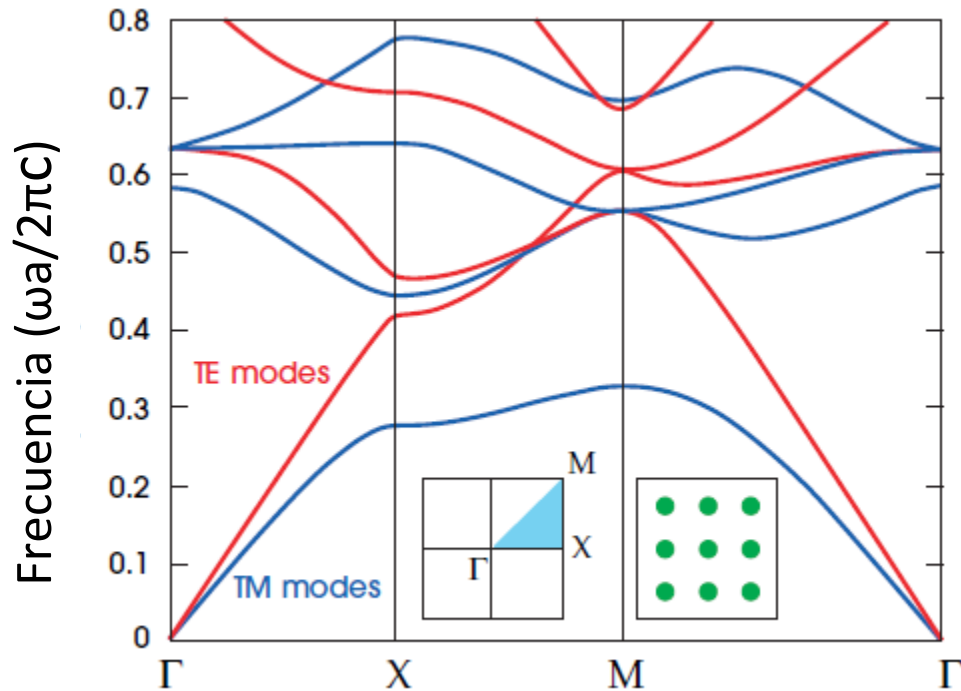


Figura 5. Estructura de bandas fotónicas de un cristal fotónico con red cuadrada de columnas dieléctricas con radio $0.2a$. Las bandas azules representan los modos TM, mientras que las bandas rojas representan los modos TE.

Otra estructura clásica es la red triangular de columnas dieléctricas. En la Figura 6 se ilustra una red de este tipo en un dieléctrico, donde se perforaron orificios en forma de columnas dieléctricas de aire de radio r y con periodicidad a .

La inclusión intencional de defectos en las estructuras de los cristales fotónicos (cualquiera que sea su dimensión), agregará características ópticas nuevas al cristal. Estos defectos pueden ser planos, líneas o puntos. La Figura 7 muestra un esquema de un cristal fotónico bidimensional con red cuadrada de columnas dieléctricas, en la que se agregaron algunos defectos.

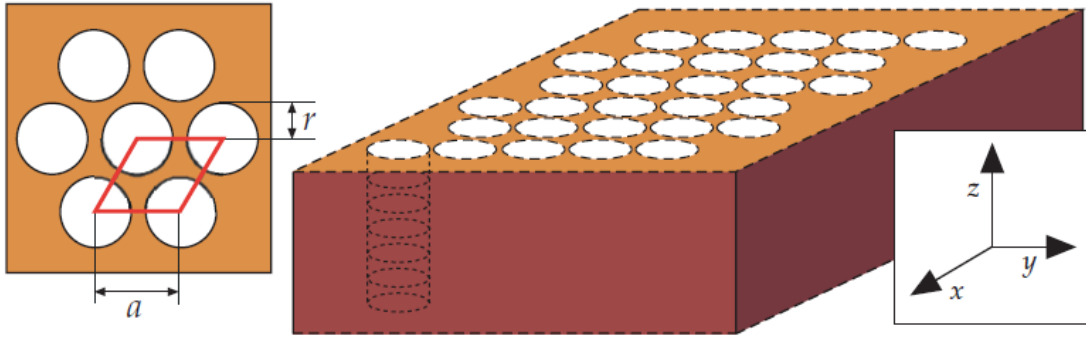


Figura 6. Cristal fotónico 2D de red triangular con columnas de aire en un sustrato dieléctrico (se extiende al infinito en dirección z).

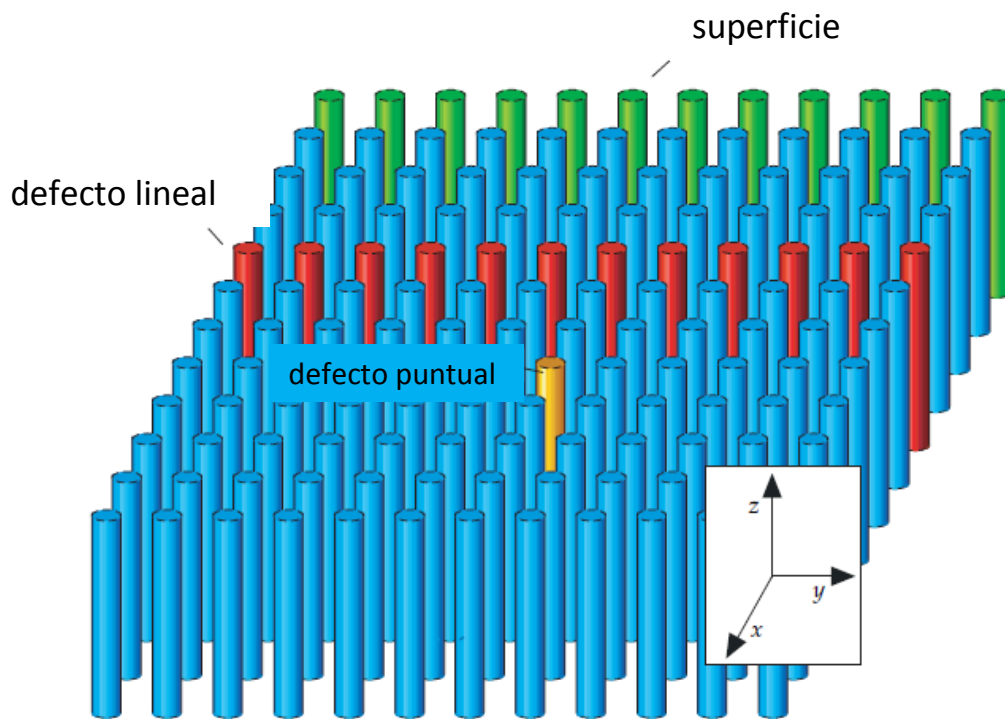


Figura 7. Cristal fotónico 2D con red cuadrada de columnas dieléctricas que incluye defectos lineales (columnas rojas), defectos de superficie (columnas verdes) y defectos puntuales (columna amarilla)

Los defectos que se inducen en un cristal fotónico para agregar una característica óptica específica pueden ser: cambio de material dieléctrico, cambio de forma del dieléctrico o tal vez la ausencia de material. Al perturbar el cristal fotónico con defectos como los ilustrados en la Figura 8, se pueden inducir modos de propagación dentro del gap fotónico del cristal, dándole propiedades nuevas que pueden ser explotadas para la fabricación de dispositivos tecnológicos novedosos.

II.1.3 Cristal fotónico tridimensional.

En el caso de los cristales fotónicos 3D, estos presentan periodicidad de la función dieléctrica $\varepsilon(x,y,z)$ en sus tres direcciones. Estas estructuras son la analogía óptica de un cristal ordinario [9]. Los cristales fotónicos tridimensionales también presentan las características que se discutieron en las secciones anteriores, para los casos de 2D y 1D. Sin embargo, son capaces de poseer “band gaps” fotónicos completos, i.e. pueden inhibir la propagación de un rango de frecuencias en todas las direcciones del cristal, mientras que los casos anteriores solo son capaces de presentar “band gaps” fotónicos parciales, debido a su naturaleza 1D ó 2D. Como consecuencia, las estructuras fónicas tridimensionales son capaces de confinar la luz en las tres dimensiones.

En la Figura 8 se muestran algunos ejemplos de estructuras fónicas tridimensionales, las cuales presentan un “band gap” fotónico en todas las direcciones de propagación de la luz.

Por otra parte, la Figura 9 muestra las estructuras de bandas fónicas calculadas para las estructuras tridimensionales.

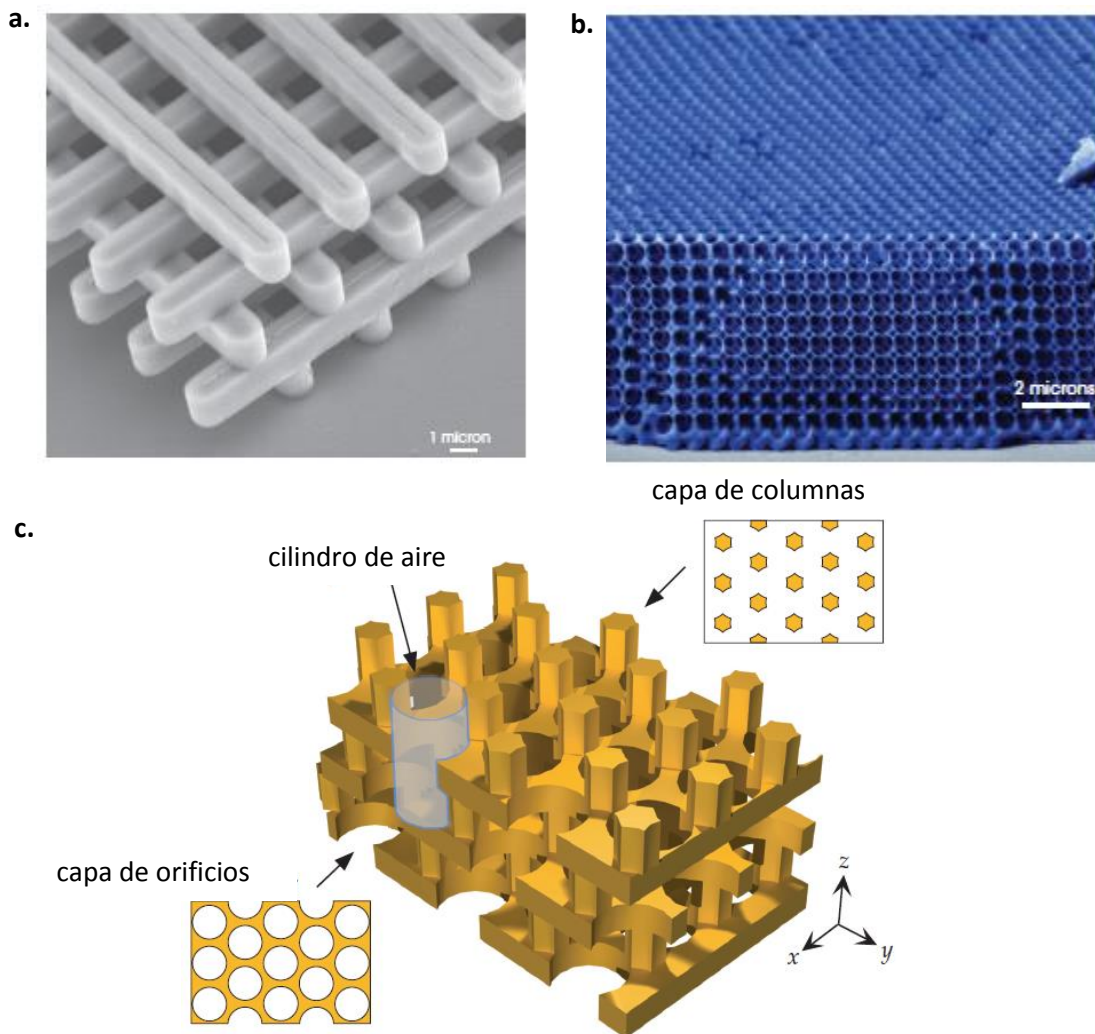


Figura 8. Cristales fotónicos 3D a) apilamiento de madera “Wood-pile”, b) estructura de ópalo invertida y c) cristal fotónico formado por una pila de capas con secciones transversales bidimensionales: redes triangulares de columnas dieléctricas en aire y orificios en dieléctrico

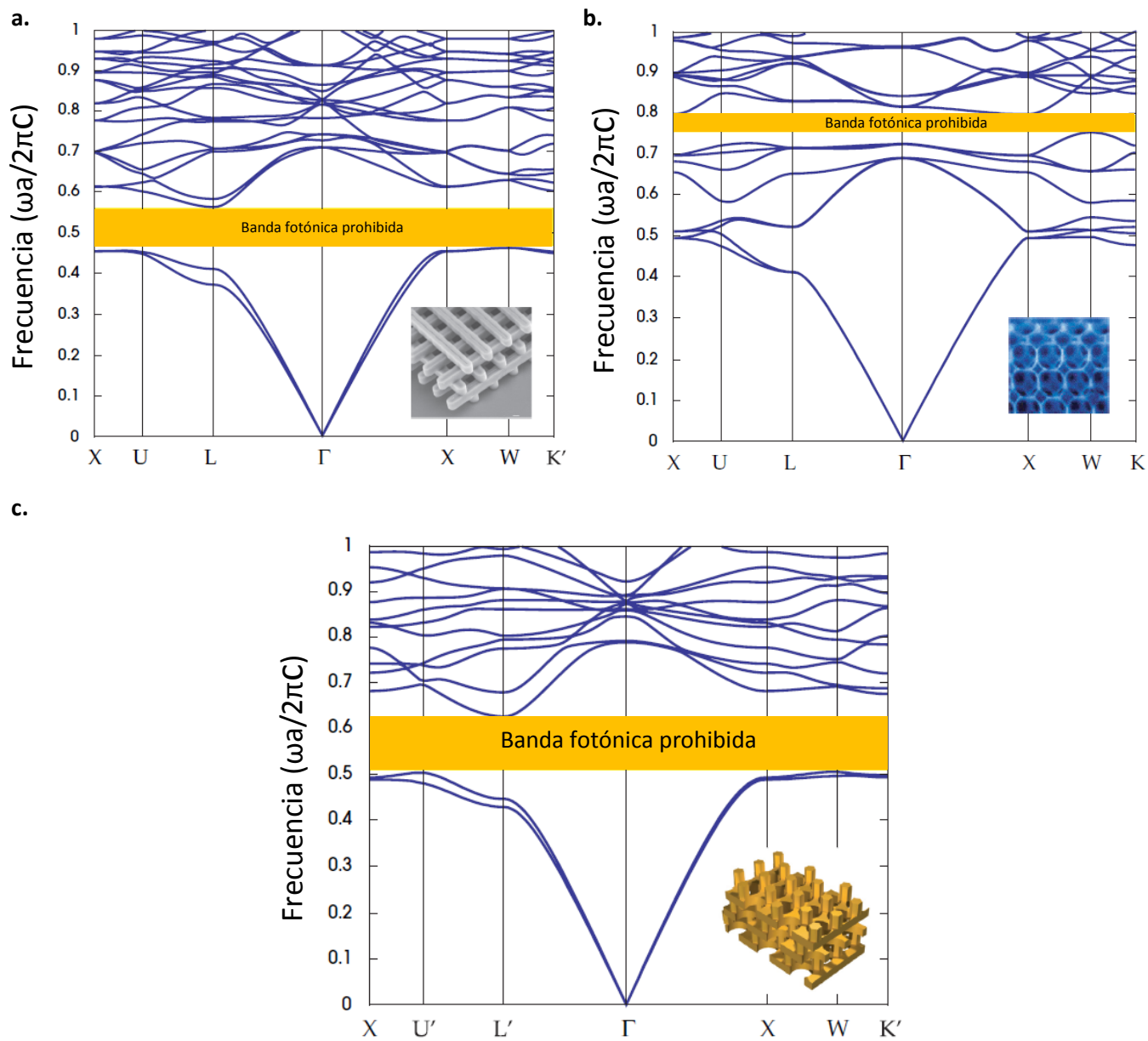


Figura 9. Estructura de bandas fotónicas de los cristales fotónicos tridimensionales a) Woodpile, b) ópalo invertido y c) capas bidimensionales con redes triangulares de orificios cilíndricos en dieléctrico y columnas dieléctricas en aire.

II.1.4 Cristales fotónicos en forma de placa.

Al igual que los cristales fotónicos bidimensionales, estas estructuras también se construyen con patrones periódicos en el plano xy , sin embargo, a diferencia de los cristales 2D, estos tienen una altura finita en el eje z , induciendo efectos adicionales al cristal fotónico bidimensional con la misma estructura fotónica. Ahora, la luz se confinará dentro del cristal por dos mecanismos. El primero de ellos es debido a la altura finita en la dirección vertical, actuando la reflexión total interna, si se considera que el haz de luz se propaga por el plano de la placa y , que ésta posee un índice de refracción mayor que los recubrimientos superior e inferior del cristal. El segundo mecanismo es el “band gap” fotónico de la estructura bidimensional en la extensión del plano xy . En la Figura 10 se muestran cuatro esquemas en vista lateral de cristales fotónicos en forma de placa con diferentes tipos de recubrimientos [10].

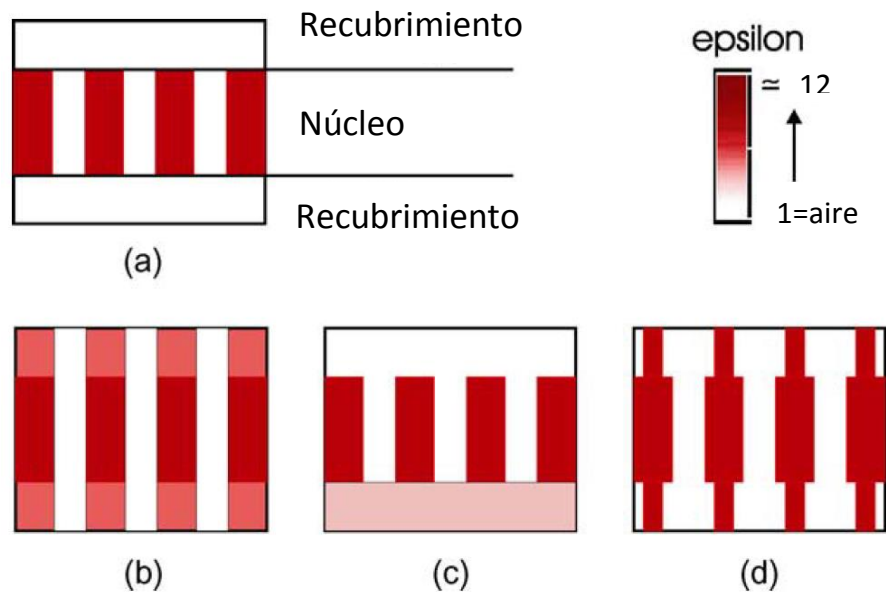


Figura 10 Vista lateral de cristales fotónicos en forma de placa: a) estructura con alto contraste de índice de refracción entre el núcleo y el recubrimiento (membrana), b) heteroestructura de bajo contraste de índice de refracción (*e.g.* AlGaAs/GaAs/AlGaAs), c) estructura asimétrica con dos recubrimientos distintos, el superior es usualmente aire y el cristal fotónico a base de silicio en aislante (SOI), y d) estructura de poros modulados.

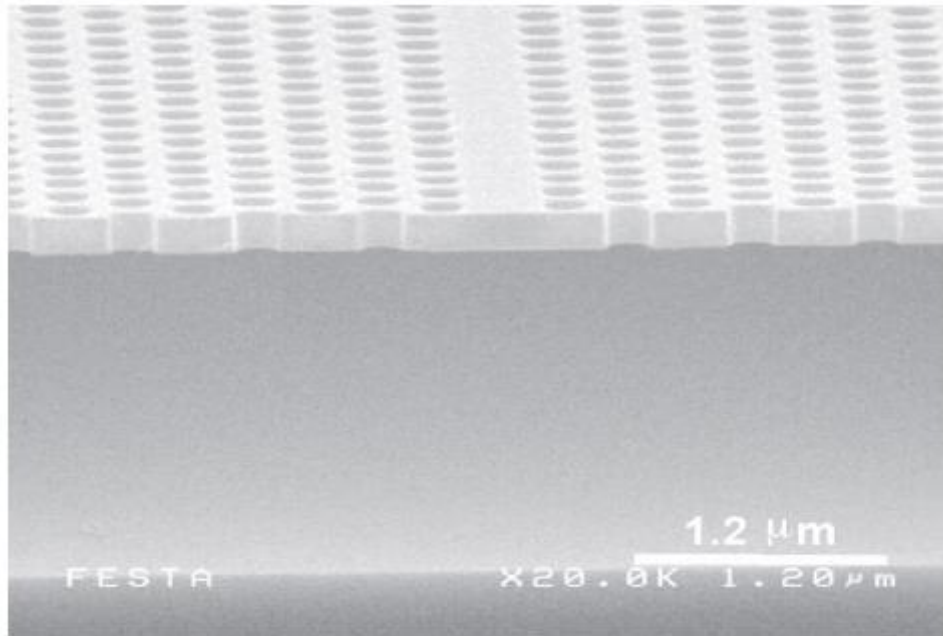


Figura 11. Cristal fotónico en forma de placa que consta de orificios cilíndricos en dieléctrico con estructura hexagonal. Esta estructura presenta un defecto lineal que funciona como guía de onda. Los recubrimientos superior e inferior son aire [13].

Los defectos en estos cristales también dan nuevas propiedades al material. En la Figura 11, se muestra un cristal fotónico que cuenta con un defecto lineal, que funciona como guía de onda, agregando un modo de propagación de luz debido a este defecto. Existen diversos defectos en estas estructuras que son utilizados para desarrollar aplicaciones tecnológicas, como las que se describen en la siguiente sección.

II.2 Aplicaciones de los cristales fotónicos.

Una de las propiedades ópticas de mayor interés en los cristales fotónicos es el gap fotónico, debido a que las aplicaciones tecnológicas que se prevén dependen de la posición y el tamaño de dicho gap en estas estructuras. Aunque actualmente la

tecnología no está tan desarrollada para la fabricación en masa de estos materiales, existen una cantidad considerable de aplicaciones opto-electrónicas, donde estas estructuras pueden ser utilizadas. Algunas de las aplicaciones de estos materiales son:

- *Manejo de radiación espontánea:* Esta característica de los cristales fotónicos juega un rol importante en el diseño de fuentes de luz. En estas fuentes, los cristales fotónicos con defectos inducidos, formando resonadores que proveen una fuerte localización de la radiación dentro del defecto, como lo ilustra la Figura 12 [2, 11, 12, 13]. Esta radiación puede ser monocromática o policromática, *i.e.* puede ser utilizada para manejo y mejoras de las características de láseres [14] y de LEDs [15, 16].
- *Aisladores ópticos:* La utilización de cristales fotónicos como aisladores ópticos nace de la capacidad que tienen estos cristales de localizar radiación, dentro de un defecto de la estructura periódica. Para que funcione como aislador, la frecuencia que se desea aislar debe caer dentro de la región del gap fotónico [7].

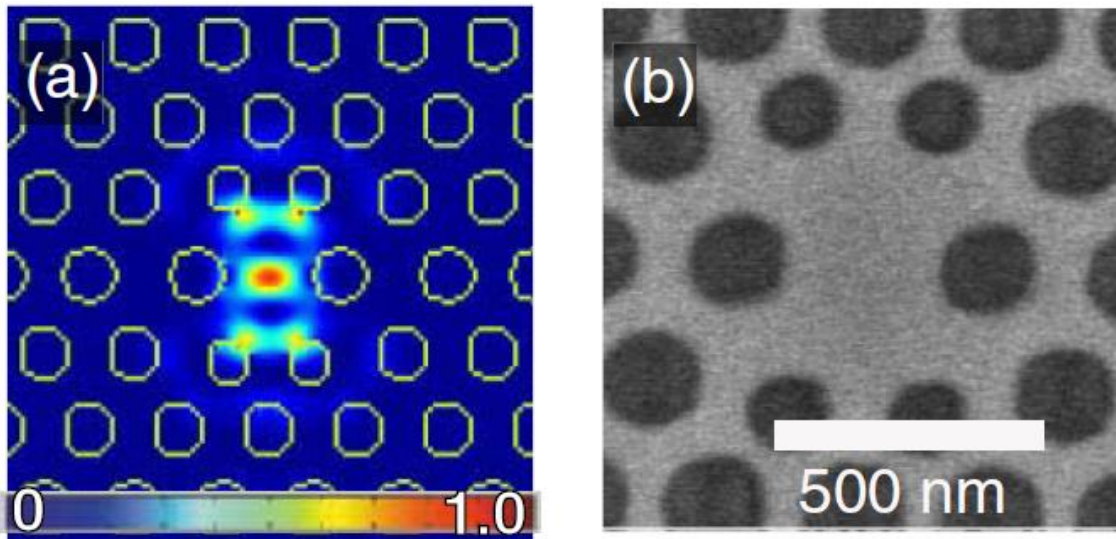


Figura 12. Cristal fotónico con cavidad central. a) Intensidad de campo eléctrico calculado con el método Diferencia Finita en el Dominio del Tiempo (FDTD). b) Micrografía del cristal fotónico con cavidad [11].

- *Guías de onda fotónicas:* Se representan por defectos lineales de las estructuras periódicas en los cristales fotónicos. Dichos defectos son capaces de guiar ondas dentro de un amplio rango de longitudes de onda. Una característica única de las guías de onda, basadas en cristales fotónicos, es la capacidad de formar dobleces en la dirección de propagación de la radiación a un ángulo de 90° e incluso mayores, alcanzando una transmitancia mayor al 98% [17, 18, 19].
- *Manejo de dispersión:* Una propiedad de dispersión única de los cristales fotónicos permite utilizarlos como súper prismas, súper lentes, multiplexores y de-multiplexores [20, 21, 22].
- *Divisores de haz:* Dispositivos ópticos que permiten dividir una potencia óptica en alguna proporción dada o separarla en haces polarizados. Los divisores basados en cristales fotónicos constan en un número de guías de onda fotónicas, conectadas en un punto. Así, la potencia que entra por una guía de onda, se divide en el punto de conexión [20].
- *Limitadores de potencia óptica:* Pueden ser utilizados para evitar daño en sensores ópticos, por la alta intensidad de radiación y por la normalización de la intensidad óptica, en la entrada de un circuito óptico. Su principio consiste en el incremento de la reflectancia de un cristal fotónico no lineal con la intensidad de la radiación. De esta forma, la intensidad óptica de salida permanece constante [7, 23].
- *Fibras micro-estructuradas:* Estas fibras ópticas consisten en cristales fotónicos de tamaño finito, con uno o muchos defectos introducidos en el centro. Existen dos tipos de fibras micro-estructuradas. Las primeras funcionan bajo el principio de reflexión total interna. Estas fibras son típicamente mono-modo, mientras que, el segundo tipo, se basa en la localización de la radiación dentro del defecto, debido al band-gap fotónico que cubre un rango de frecuencias dado. Estas últimas son fibras multimodales [24, 25].

- *Luz lenta*: Esta aplicación emplea la habilidad de los cristales fotónicos para inducir ultra-baja velocidad a longitudes de onda específicas. Los dispositivos basados en el efecto de luz-lenta pueden ser utilizados como ruteadores fotónicos en redes ópticas transparentes, micro-láseres y líneas de retraso óptico [7, 26, 27, 28].
- *Elementos no lineales*: El uso de materiales no lineales en cristales fotónicos pueden ser utilizados para almacenamiento de información. Esto debido a que el material no lineal cambia su índice de refracción, bajo la presencia de radiación de alta intensidad que pasa a través de él. Este efecto tiene lugar cuando dos haces de luz, que tienen suficiente potencia, inciden en la estructura fotónica no lineal, de tal forma que las características del cristal fotónico cambian, particularmente la reflectancia y la transmitancia. Así, mediante este principio, se puede controlar el cierre o apertura de un interruptor óptico con la intensidad de radiación incidente en el material, debido a la presencia de uno o dos haces de luz [7].

CAPITULO III

METODOS DE FABRICACION

Los métodos de fabricación de cristales fotónicos son diversos. En este trabajo de tesis se presenta una reseña de los métodos de fabricación de estos materiales. Sin embargo, la fabricación de cristales fotónicos unidimensionales no se discute en este reporte, debido a que han sido ampliamente estudiados bajo el nombre de apilamientos dieléctricos en el pasado. Existe una variedad de métodos para cada tipo de cristal fotónico (2D, 3D y placas), estos se discuten en los siguientes apartados.

III.1 Fabricación de cristales fotónicos bidimensionales

Existen dos tipos de cristales fotónicos que se pueden construir en dos dimensiones; los cristales fotónicos bidimensionales (2D) y los cristales fotónicos en forma de placa (slabs). Los primeros son estructuras periódicas en dos direcciones, mientras que en la tercer dirección (típicamente el eje z) la característica del cristal

fotónico permanece constante hasta el infinito. Para fines experimentales, una dimensión finita muy grande en z , comparada con la periodicidad de la red, es considerada como infinito. Por su parte, los cristales fotónicos en forma de placa (también conocidos como cristales fotónicos planos) tienen periodicidad en 2D tal como los cristales fotónicos bidimensionales, sin embargo, la dimensión del eje z es finita (del orden de la periodicidad de la red). Estos cristales confinan los campos ópticos en un plano de dos dimensiones [5, 9]. En la sección III.2 se discuten los métodos de fabricación de los cristales fotónicos planos.

A continuación se describen los métodos más comunes empleados en la fabricación de cristales fotónicos bidimensionales [16]:

- *Litografía:* Esta técnica se ha tomado de la industria micro-electrónica, sin embargo, como en el caso de un cristal fotónico las dimensiones de la red son muy pequeñas (periodicidad de 200-700nm y con dimensiones del objeto que se repite periódicamente ~ 100 nm), no es posible utilizar la fotolitografía estándar. La alternativa es utilizar la litografía por haz de electrones (EBL). Con éste método se fabrican máscaras para fabricar los cristales fotónicos mediante ataque químico.
- *Utilización de máscaras:* El enmascarado es sólo un elemento que contribuye a la fabricación de cristales fotónicos, sin embargo, es un elemento importante que tiene impacto en la calidad del cristal que se fabrica, así como en sus características geométricas, por esta razón es necesario elegir correctamente el material que servirá como máscara. El material de la máscara deberá erosionarse a una razón considerablemente menor que el material donde se grabará la estructura periódica, durante el proceso de “grabado seco” (Dry Etching).
- *Dry Etching:* El grabado con haz de iones asistido químicamente (CAIBE) es una técnica de “dry etching”, utilizada en la fabricación de cristales fotónicos. En CAIBE, un haz de iones colimado de alta energía incide sobre la muestra durante un

periodo de tiempo muy corto, para efectuar un grabado por reacción de iones (RIE). La química para el grabado estándar de los semiconductores GaAs/AlGaAs es a base de cloro, usando SiCl_4 o Cl_2 , materiales que asisten al haz de iones para acelerar el proceso de grabado. Este método requiere de una máscara para proteger diversas regiones en el material, para obtener un patrón periódico en la muestra. Este define un cristal fotónico en particular. La Figura 13 muestra un par de ejemplos de cristales fotónicos construidos mediante “dry etching” [29].

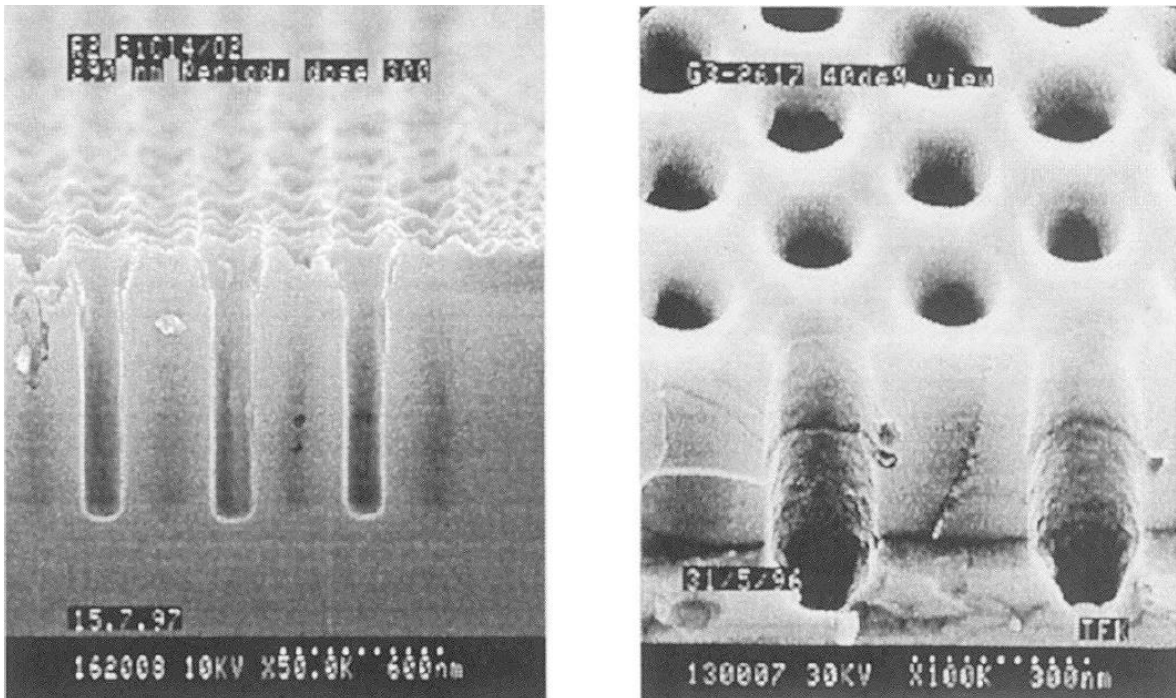


Figura 13. Dos ejemplos de redes fotónicas 2D fabricadas con litografía de haz de electrones y grabadas en una guía de onda GaAs/AlGaAs, utilizando RIE y máscaras dieléctricas.

- *Electroquímica:* Método también conocido como “grabado anódico y crecimiento”. Se han logrado “aspect ratios” impresionantes con esta técnica en alúmina y en silicio como lo ilustra la Figura 15. Con este método se han obtenido “aspecto

ratios" $>50:1$, comparándose favorablemente con "ratios" $<10:1$ que son típicos de "dry etching".

El alto grado de regularidad alcanzable con el proceso electroquímico sobrepasa las estructuras generadas por medios litográficos, como lo ilustra la Figura 14 [16]. El único requerimiento para iniciar el proceso es algo de discontinuidad en la superficie; una vez que el proceso da inicio, el tamaño del poro es determinado por la corriente electroquímica y no por el tamaño de la irregularidad en la superficie que inicia el proceso [30].

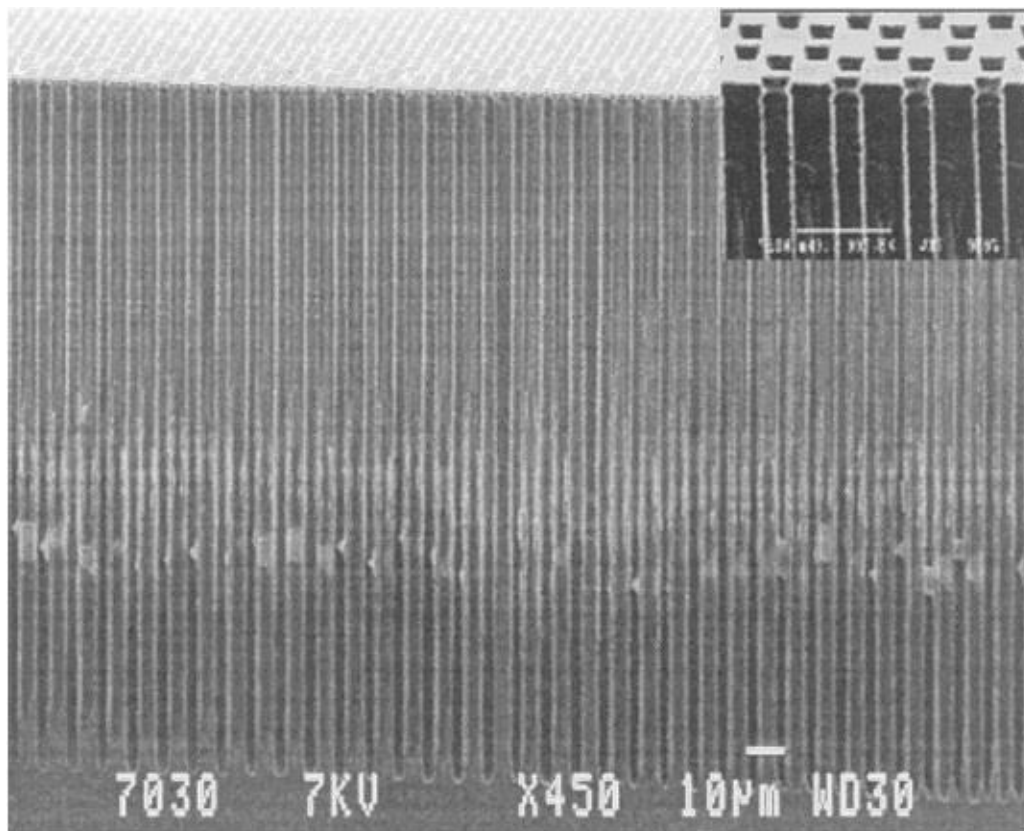


Figura 14. Micrografía de un cristal fotónico bidimensional fabricado por grabado anódico ("silicio macro-poroso"). La estructura describe una red hexagonal o "grafito" como se indica en la imagen insertada.

- *Oxidación vertical selectiva*: Para fabricar un cristal fotónico es necesario cambiar de forma periódica espacialmente las propiedades ópticas del material base, es por eso que se perfora un patrón de orificios mediante diversas técnicas. De esta forma, se crea un alto contraste de índice de refracción, tal como se ilustra en la Figura 15. Sin embargo, la distribución de orificios presentes en la superficie de la muestra dificulta el depósito de espejos o contactos, una vez grabada la estructura. La oxidación vertical selectiva mantiene la integridad física del material, produciendo una microestructura completamente sólida debido a que esta produce “columnas de óxido”, que brindan un contraste de índice de refracción, evitando la necesidad de perforar el material. El problema de esta técnica es que los “aspect ratios” (AR) que pueden alcanzarse son muy pequeños (1:1), además de tener muy altas probabilidades de generar microfracturas o problemas estructurales tales como delaminación [16].

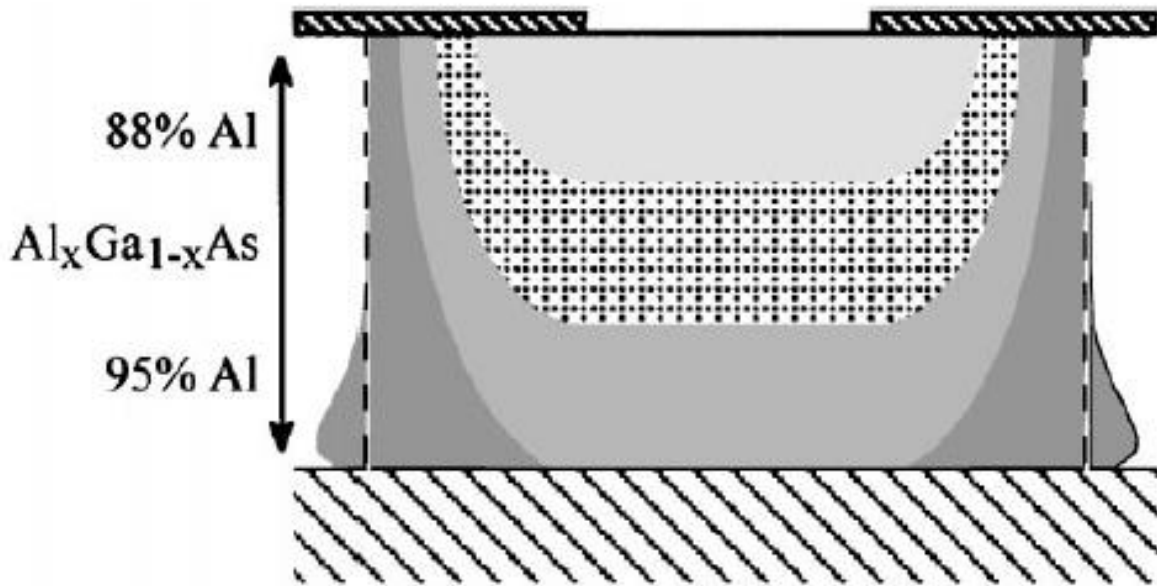


Figura 15. Esquema de sección transversal de una columna de óxido, producida por el método de oxidación selectiva, en la fabricación de cristales fotónicos.

- *Haz enfocado de iones:* Un método muy útil para la fabricación de prototipos rápidos y modificación de cristales fotónicos, es el haz enfocado de iones (FIB). Este equipo permite hacer un micro-maquinado sin la necesidad de utilizar máscaras o irregularidades en el material, como lo requieren algunos métodos anteriormente mencionados. Para fabricar cristales fotónicos mediante FIB, sólo es necesario indicar al equipo el patrón donde debe erosionar el material y establecer los parámetros de erosión. Con este equipo es posible hacer varias iteraciones en un mismo material de forma rápida. En la Figura 16 se muestra un patrón periódico fabricado mediante FIB y su sección transversal [31]. El inconveniente principal en este método es la redeposición del material erosionado, que provoca que las paredes de los oricios no sean paralelas [32].

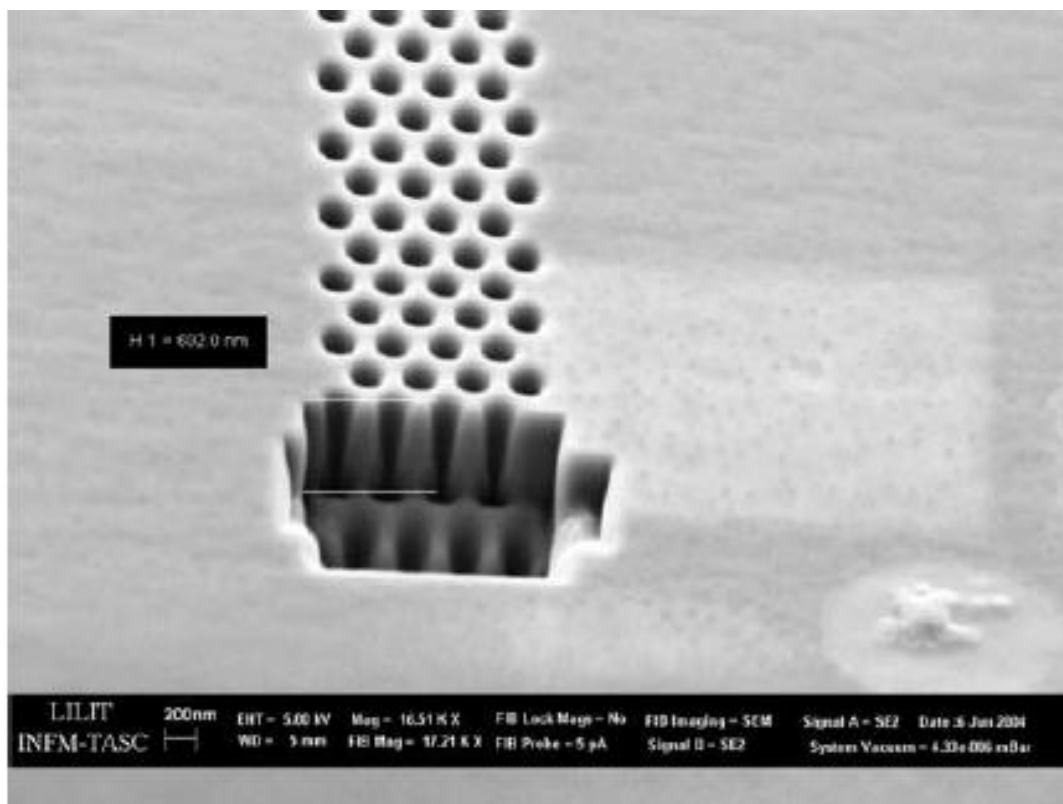


Figura 16. Micrografía de un patrón periódico fabricado mediante FIB [32]. El corte transversal muestra una profundidad de 600nm de profundidad de los

III.2 Fabricación de cristales fotónicos en forma de placa

Joannopoulos et al [9], afirman que estas estructuras son híbridas, debido a que cuentan con periodicidad en dos dimensiones, pero tienen una altura finita. La Figura 17 muestra esta característica. Esto introduce un comportamiento cualitativamente nuevo, debido a que la luz es confinada dentro de la placa del cristal fotónico por la reflexión total interna, siempre que el material utilizado como recubrimiento tenga un índice de refracción (n) menor. En estas estructuras es posible introducir defectos intencionalmente, como se ilustra en la Figura 18. Estos defectos pueden ser usados para formar guías de onda y cavidades resonantes. Esto abre un panorama amplio para una gran cantidad de aplicaciones tecnológicas. Haciendo uso de las características antes descritas, se han realizado algunas aplicaciones experimentalmente utilizando técnicas de litografía, basados en patrones de dos dimensiones.

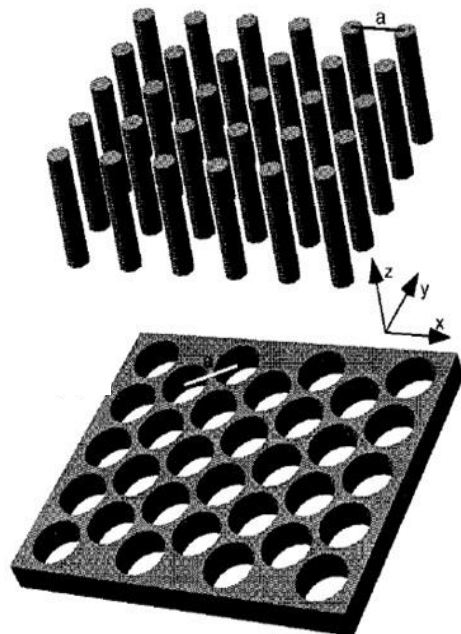


Figura 17. Cristales fotónicos planos (slabs). a) Red cuadrada de pilares en aire con altura de $2a$. b) Red triangular de orificios en una placa dieléctrica de espesor $0.6a$. Ambas placas están suspendidas en aire.

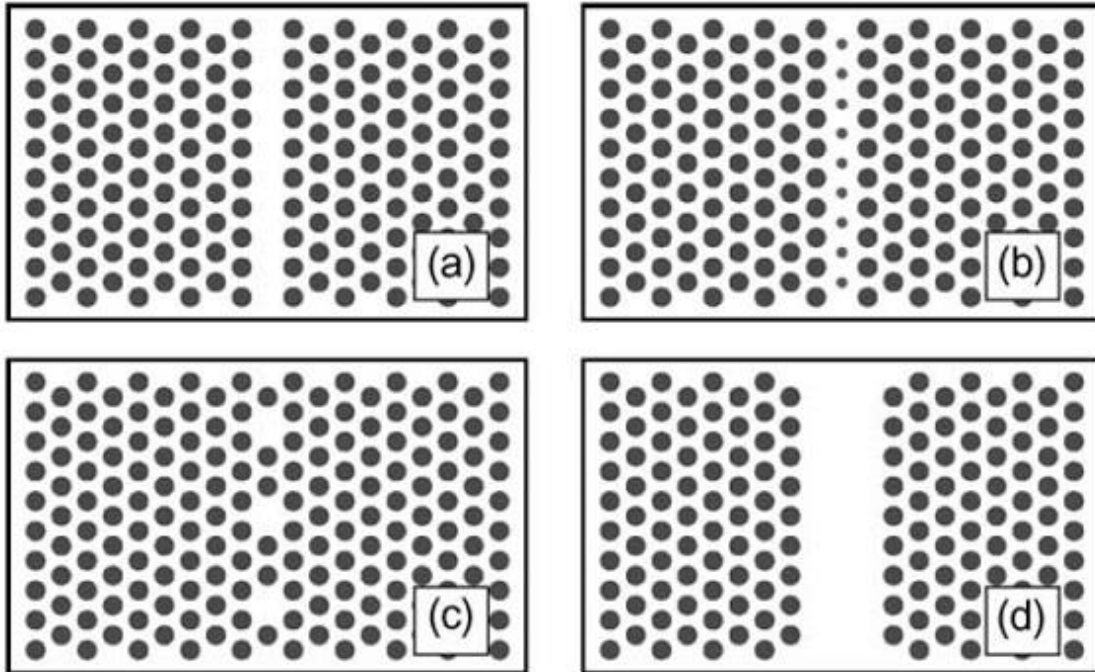


Figura 18. Ejemplos de guías de onda en cristales fotónicos: a) guía de onda W1 (*i.e.* guía de onda con ancho de un renglón de un poro), que consiste en un renglón de poros faltantes, b) guía de onda que consiste en un renglón de poros de diámetro menor, c) guía de onda de cavidad acoplada y d) guía de onda W3 (*i.e.* con anchura de tres renglones de poros).

Hasta el momento solo se ha supuesto que el cristal fotónico plano es una membrana, como la mostrada en la Figura 17. Sin embargo, es conveniente obtener estas estructuras recubiertas con otro material (distinto al aire), que facilite la reflexión total interna dentro de la placa donde se propaga la longitud de onda, permitiendo un mayor control en la dirección de propagación del haz de luz, o si se desea, en la modificación de sus características.

Los métodos de fabricación de los cristales fotónicos bidimensionales pueden ser empleados para fabricar cristales fotónicos planos (slabs). No obstante, en la última década, se ha estudiado con mayor énfasis la factibilidad de emplear el equipo de haz de iones enfocados para la fabricación de cristales fotónicos. Debido a que éste ha

mostrado ser un método prometedor, al reducir el tiempo de grabación de las estructuras periódicas en el cristal fotónico y es muy flexible para ajustar parámetros nuevos, si es necesario (*i.e.* agregar defectos a alguna estructura) [20]. Empleando esta metodología se obtiene alta calidad en el acabado del cristal fotónico esculpido, se logra igualar las dimensiones que otras técnicas han alcanzado (“aspect ratios” y diámetros de orificio de ~100nm) y se obtiene una gran fidelidad en la fabricación del cristal respecto al diseño [14].

Los autores que han utilizado el FIB para fabricación de cristales fotónicos concuerdan en que es una herramienta versátil y se vislumbra un buen futuro en su uso. Principalmente en el mercado de las telecomunicaciones [20], debido a que los cristales fotónicos que se han logrado fabricar, presentan longitudes de onda de trabajo alrededor de los 1550nm (IR cercano). Esta frecuencia es ampliamente utilizada en el campo tecnológico mencionado. Sin embargo, todos los autores convergen en los cuidados que deben tenerse al utilizar el FIB para este propósito, debido a que esta técnica tiene como inconveniente la re-deposición del material erosionado sobre la estructura esculpida [16, 32]. La Figura 19, muestra el efecto de la redeposición del material para 4 diferentes parámetros de erosión por FIB [32]. Como solución a este problema, algunos de ellos sugieren el uso de flujo gas para evitar esta re-deposición [20], inclusive existen reportes donde se comenta que esto ya ha sido implementado, obteniéndose mejoras en la fabricación de estos cristales [31].

Las micrografías que muestra la Figura 20, son algunas estructuras fotónicas planas que se han fabricado empleando la técnica de micro-maquinado con FIB. En ellas podemos observar la dimensión de los orificios perforados que es del orden de 300 nm de diámetro [14].

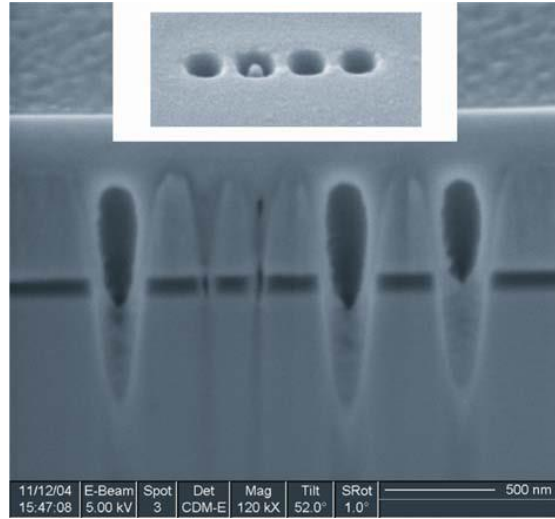


Figura 19. Imagen de la sección transversal erosionada con FIB. La re-deposición de material afecta el AR del orificio.

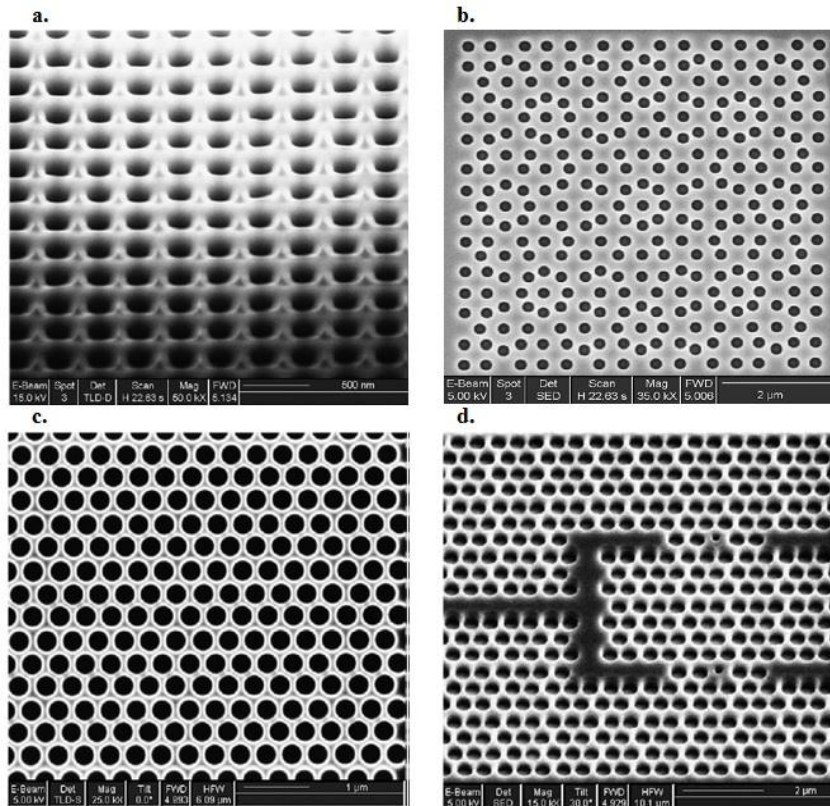


Figura 20. a) Red cuadrada fabricada en silicio sobre aislante (SOI). b) Cuasi-cristal con estructura 8-fold escrita en GaAs. c) Estructura triangular grabada en GaN. d) Multiplexor divisor de longitud de onda fabricado con FIB.

Debido a las características y capacidades que presenta el FIB, éste puede ser utilizado para hacer modificaciones en cristales fotónicos previamente fabricados debido a que puede posicionarse en cualquier punto de la superficie del material para elegir el punto o la región donde se agregará una nueva característica. En la Figura 21 se muestra como Nellen *et al*, modificaron un cristal fotónico divisor de potencia empleando un FIB para modificar sus propiedades ópticas.

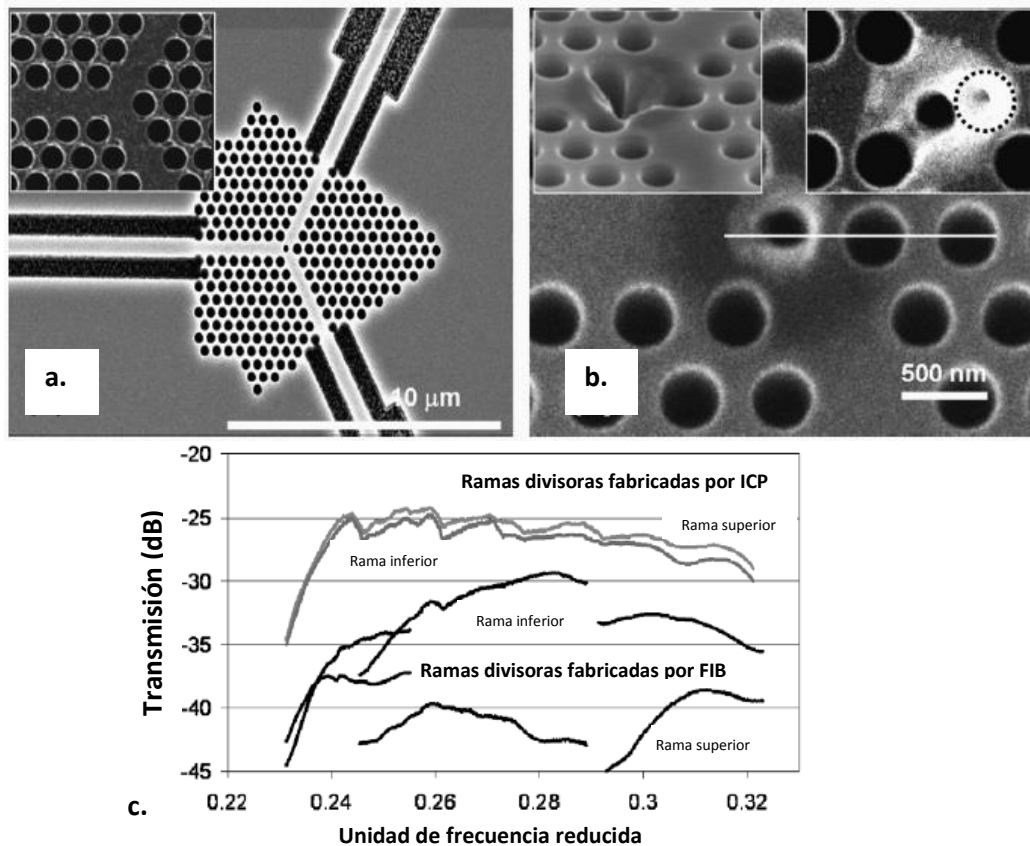


Figura 21. a) Cristal fotónico divisor de potencia fabricado por litografía de haz de electrones, iones de plasma acoplado y grabado por iones reactivos (EBL/ICP-RIE) con y sin orificio central (insertado). b) Modificación hecha con FIB con un desplazamiento respecto al centro, en el inserto se ve una modificación con forma de embudo. c) comparación de transmisión: EBL/ICP-RIE (gris), modificado con FIB perforando un orificio central (negro). Se observa cómo la transmisión de las dos ramas (superior e inferior) sufrió modificaciones al agregar un orificio con un desplazamiento respecto al centro y el desplazamiento de la transmitancia en la gráfica del inciso c) está asociada a la posición del orificio.

III.3 Fabricación de cristales fotónicos tridimensionales

Los cristales fotónicos tridimensionales pueden encontrarse en forma natural o artificial [9]. Podemos citar la piedra del ópalo como un cristal fotónico tridimensional que se forma naturalmente. La micro-estructura del ópalo consiste en un número de microesferas colocadas en nodos de red cúbica centrada en las caras (FCC). Otras estructuras que pueden fabricarse de forma artificial con el propósito de obtener cristales fotónicos tridimensionales son: FCC (cúbica centrada en las caras), woodpile (apilamiento de madera), red espiral y red de cuasi-diamante [7]. La Figura 22 muestra estas estructuras.

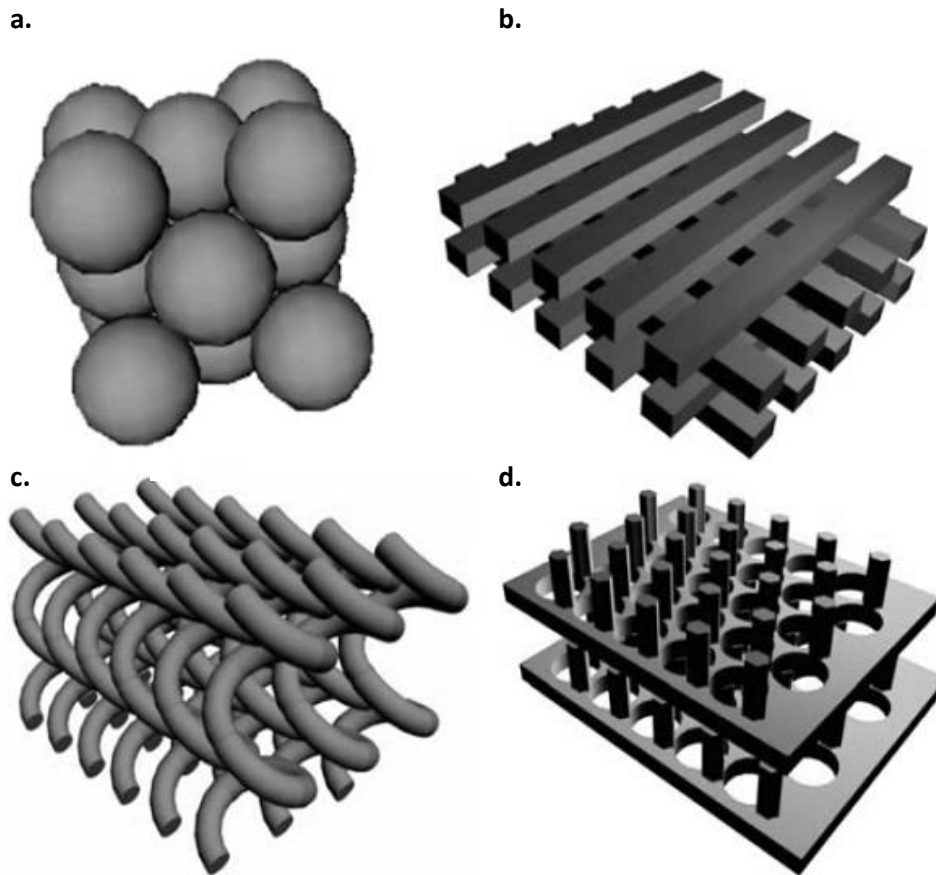


Figura 22. Ejemplos de cristales fotónicos tridimensionales. a) cúbica centrada en las caras (FCC), b) apilamiento de madera (Wood-pile), c) red espiral (spiral lattice), d) red cuasi-diamante.

Los métodos más comunes de fabricación de cristales 3D son:

- Micro-maquinado: En la técnica de micro-maquinado es posible utilizar diversas alternativas de fabricación como “fabricación de lado por lado”, “técnica de auto-clonado” y “deposición en ángulo”. Con esta técnica es posible obtener estructuras como las descritas en la Figura 23, b), c) y d) [7, 9].
- Litografía holográfica: Para la ejecución de esta técnica, se hacen interferir muchas ondas ópticas coherentes dentro de un material fotoresistivo, que posteriormente se utiliza para fabricar los cristales fotónicos. Un ejemplo de las estructuras que se pueden obtener se muestran en la Figura 24 [29].
- Polimerización multi-fotón: Esta técnica emplea un efecto óptico no-lineal llamado “absorción multi-fotón”. Con este método es posible obtener cristales fotónicos como el de la Figura 23, b) [16].

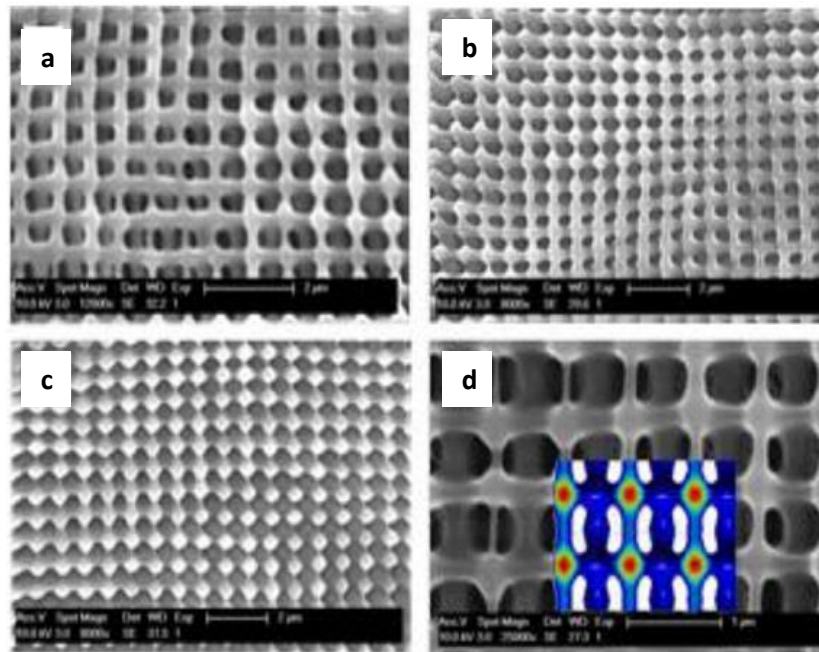


Figura 23. Micrografía SEM de patrón grabado en polímero foto-resistivo con interferencia de 5 haces. (a-c) La estructura fotónica fabricada, d) vista ampliada de SEM (a) mostrando (insertada) la simulación con un retraso de π .

- Auto-ensamble: Se refiere a un proceso que conduce a la formación espontánea en sistemas arreglados aleatoriamente, el ópalo tiene este proceso de forma natural [4]. Una estructura fabricada con este procedimiento se muestra en la Figura 24. Para formar cristales fotónicos con ésta técnica es necesario hacer una suspensión coloidal [12].

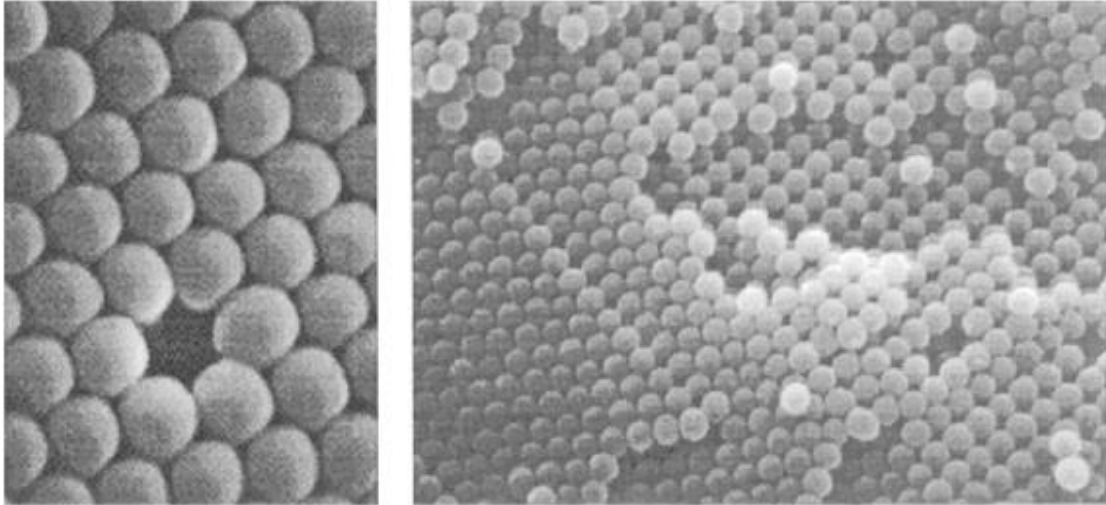


Figura 24. Acercamiento y vista general de la estructura del ópalo con esferas de sílica. Las esferas son de aproximadamente 260nm de diámetro.

CAPITULO IV

TECNICAS EXPERIMENTALES

En este trabajo de investigación se fabricaron y caracterizaron tres cristales fotónicos, empleando la técnica de erosión por haz enfocado de iones (FIB). No obstante, antes de fabricar las estructuras con las que se llevó a término esta investigación, se caracterizó el equipo JEOL JEM-9320-FIB del Laboratorio Nacional de Nanotecnología de Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV). Esto, con el afán de garantizar muestras de buena calidad para la experimentación. La caracterización en el equipo FIB consistió en determinar sus capacidades de fabricación de estructuras pequeñas de orden nanométrico, sobre sustratos de silicio. Es importante hacer notar que este equipo es capaz de maquinado orificios en forma de “caja”, “líneas” y “spots” solamente. Dadas estas condiciones, fue necesario completar diversas pruebas de maquinado, para determinar los parámetros óptimos de la fabricación de cristales fotónicos en un sustrato de silicio mono-cristalino.

Una vez determinados los parámetros óptimos de maquinado para la obtención de estructuras fotónicas de calidad con el equipo FIB disponible en CIMAV, se realizaron experimentos de caracterización óptica, para obtener las propiedades de reflectancia de los cristales fotónicos obtenidos. Esta propiedad se midió empleando un láser multicanal de fibra óptica Thorlabs MCLS1 de longitudes de onda de 785 nm, 852 nm y 1550 nm, para determinar el comportamiento de la muestra en un amplio espectro de longitudes de onda.

IV.1 Fabricación de los cristales fotónicos.

IV.1.1 Fabricación de cristal fotónico de orificios cuadrados.

En el primer intento de fabricación de un cristal fotónico en este trabajo de investigación, se esculpió una estructura cuadrada (5x4) con orificios cuadrados de $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$ y una constante de red $a = 3\ \mu\text{m}$, sobre un sustrato de silicio con un recubrimiento metálico de Au, como se muestra en la Figura 25.

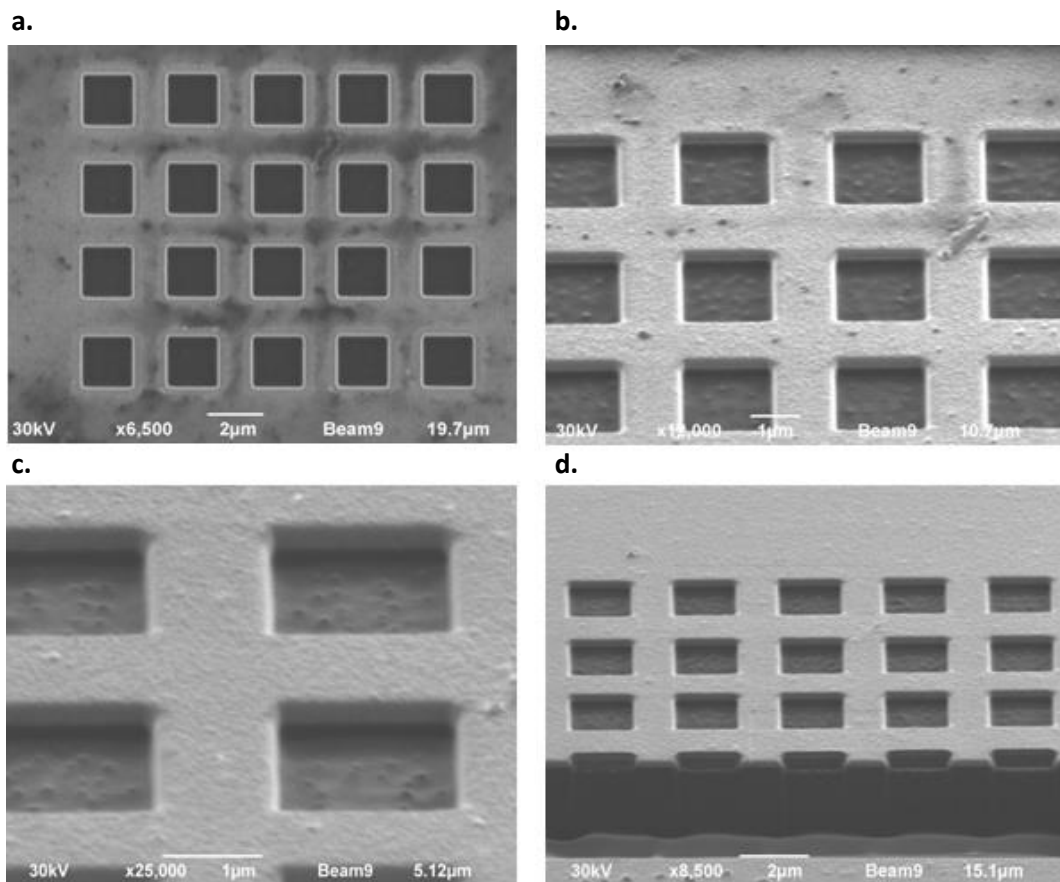


Figura 25. Micrografía FIB de: a) Patrón esculpido de una estructura cuadrada (5x4) con orificios cuadrados de $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$, b) Vista a 45° de la estructura esculpida. c) Vista a 60° de la estructura. d) Sección transversal de la estructura.

Para continuar con la evaluación de la capacidad del equipo, se procedió a reducir las dimensiones de los orificios y la periodicidad de la red. El nuevo patrón consistió de orificios cuadrados de $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$, en un sustrato de silicio, recubierto con una capa de zirconia (ZrO_2). En esta ocasión el micro-maquinado se realizó con el haz “beam6”. Durante el desarrollo de estos primeros intentos de construcción de un cristal fotónico, se encontraron algunas dificultades con este haz, para las dimensiones descritas. Sin embargo, después de realizar un alineamiento más refinado que el alineamiento normal de la columna de iones, se logró reproducir el patrón geométrico de acuerdo a lo diseñado. El resultado obtenido después de realizar estos cambios se muestra en la Figura 26.

En la micrografía mostrada en la Figura 26 a) se presentan 3 filas de orificios cuadrados, construidas cada una de ellas bajo condiciones distintas de micro-maquinado:

- 1ª fila: Perforaciones realizadas con el haz de iones “beam6”, el tiempo requerido para maquinar cada uno de los orificios fue 10 s. Se obtuvo una profundidad de orificio de $\sim 400\text{nm}$. Claramente puede observarse un des-alineamiento entre los orificios esculpidos en la muestra.
- 2ª fila: Los orificios se realizaron con el mismo haz de iones que la primera fila. Para este propósito, fue necesario hacer algunos ajustes en la alineación de la columna de iones para este haz de fresado. El tiempo requerido para efectuar cada orificio fue de 10 s. La profundidad obtenida bajo estas condiciones fue $\sim 400\text{nm}$. Con estos cambios efectuados, se observó que el alineamiento del patrón de orificios maquinados se mejoró notablemente.
- 3ª fila: Conservando la alineación obtenida en el paso anterior y aumentando el tiempo de maquinado a 20s, se obtuvieron orificios correctamente alineados con una profundidad mayor a los de la segunda fila. La profundidad obtenida de los orificios fue de una micra aproximadamente.

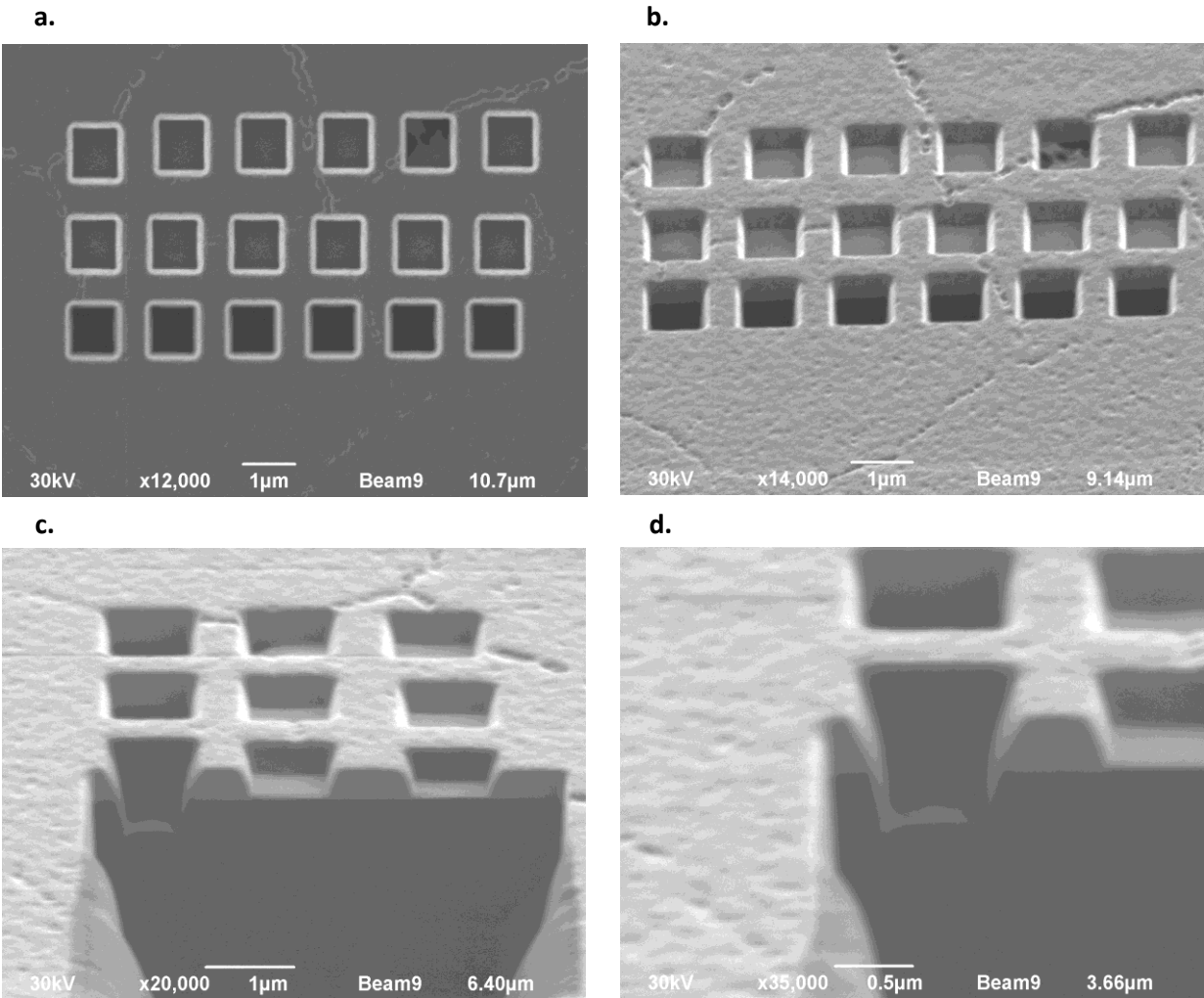


Figura 26. Micrografía FIB de patrón de orificios cuadrados de $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$, fresados en silicio recubierto de Zirconia: a) la primer fila de cuadrados (de arriba hacia abajo) se maquinó con “beam6”; para maquinar la segunda fila se realizaron ajustes en la alineación del haz, ambos casos con el mismo tiempo de exposición del haz sobre la muestra (10s cada orificio); la tercer fila conserva las dimensiones que los casos anteriores, cambiando el tiempo de exposición 20 s por orificio. b) Vista a 45° de la estructura esculpida. c) Sección transversal de las 3 filas esculpidas en la muestra. d) Acercamiento a un orificio de la fila que se expuso por 20 s.

En la Figura 26 se puede observar cómo los orificios de las filas 2 y 3 están ligeramente desfasadas, una con respecto de la otra, además de presentar dimensiones ligeramente distintas. Esto demuestra que el tiempo de exposición afecta la posición y precisión de los patrones geométricos, que se diseñan para esculpir en la muestra. Por otra parte, en la sección transversal mostrada en la Figura 26 c) se observa el efecto de la redeposición de material erosionado, sobre las paredes de los orificios. Este fenómeno se agrava a medida que se aumenta el tiempo de exposición de la muestra, al realizar un orificio más profundo. Nellen *et al* [32], sugieren algunas técnicas de maquinado con el FIB para reducir el efecto de redeposición de material. Estas técnicas incluyen un perfil de tiempo de maquinado como función del diámetro de los orificios perforados. Por otra parte, otros autores sugieren el uso de un flujo de flúor gaseoso [31] o gas de I_2 [33] para evacuar el material erosionado, y evitar así la redeposición de material sobre la estructura maquinada.

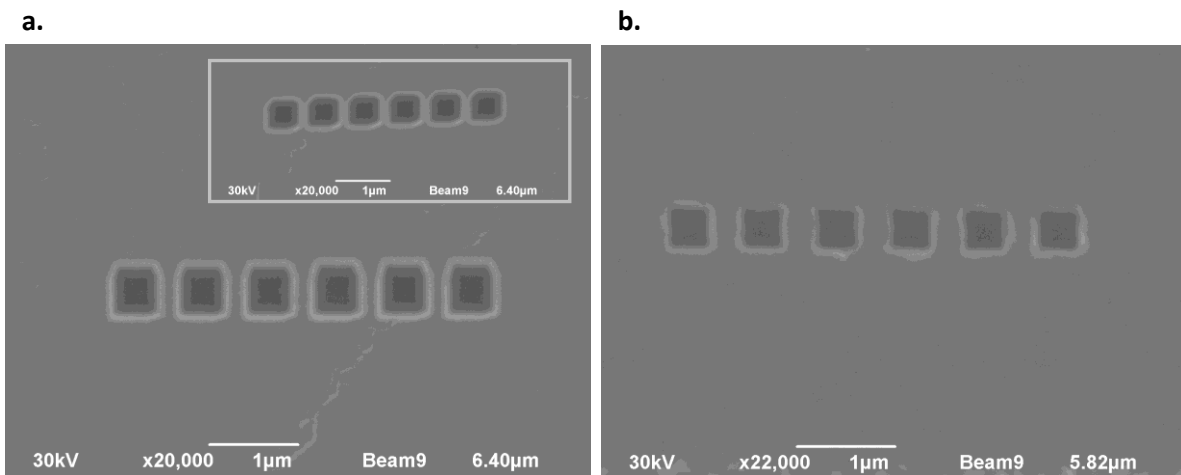


Figura 27. Micrografía FIB de: a) Fila de orificios cuadrados de $0.5\mu\text{m} \times 0.5\mu\text{m}$ fresada en un sustrato de silicio recubierto de zirconia. En la imagen insertada, se ve la fila de cuadrados que se obtuvo antes de realizar alineación de columna, para estas dimensiones y b) fila de orificios cuadrados de $0.5\mu\text{m} \times 0.5\mu\text{m}$ fresada en un sustrato de níquel.

Con el objeto de reducir aún más la dimensión de los orificios, se ajustó la magnificación del equipo para esculpir orificios cuadrados de $0.5\ \mu\text{m} \times 0.5\ \mu\text{m}$ usando el haz “beam6”, sobre el mismo material (silicio recubierto con zirconia). Sin embargo, los resultados logrados no fueron satisfactorios, debido a que se obtuvieron algunas desalineaciones y la forma de los orificios se aleja ligeramente de una geometría cuadrada, como lo ilustra la imagen insertada en la Figura 27 a). Posteriormente, se realizaron ajustes de alineación de la columna de iones, para mejorar las dimensiones y geometrías de las estructuras fresadas. Se repitió el grabado con las nuevas condiciones de alineamiento, mejorando su aspecto y alineación sustancialmente como se observa en la Figura 27 a). Finalmente, conservando la alineación lograda y conservando los parámetros de erosión, se grabó el mismo diseño de estructura (una fila de orificios cuadrados de $0.5\ \mu\text{m} \times 0.5\ \mu\text{m}$), sobre un sustrato de níquel (Ni). El resultado se observa en la Figura 27 b), la cual muestra que cada material tiene un comportamiento distinto bajo las mismas condiciones de erosión, ya que la fila de orificios fresados en un sustrato de níquel luce distinta a aquellas esculpidas en silicio recubierto de zirconia. Cabe destacar que la superficie de la muestra de níquel que se empleó, resultó ser más rugosa que la superficie de la muestra de silicio recubierta con zirconia.

Una vez determinados los mejores parámetros de erosión en el FIB para la fabricación de estructuras fotónicas, en un sustrato de silicio recubierto con zirconia, se fabricó una estructura de red triangular con periodicidad $a = 1.5\ \mu\text{m}$ de orificios cuadrados de $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$. La Figura 28 muestra la estructura maquinada sobre el material. El tiempo de fabricación de esta estructura de 48 orificios fue de 15 minutos aproximadamente.

En las micrografías c) y d) de la Figura 28 observamos que la profundidad de los orificios es $\sim 400\ \text{nm}$. También, la Figura 28 a) muestra un ligero corrimiento de las estructuras. Este corrimiento es atribuido a efectos de carga de la superficie de la muestra, que afectan el desempeño del FIB durante el grabado. Se cree que estos

efectos de carga cambian el enfoque del haz de iones, provocando un des-alineamiento de las estructuras resultantes.

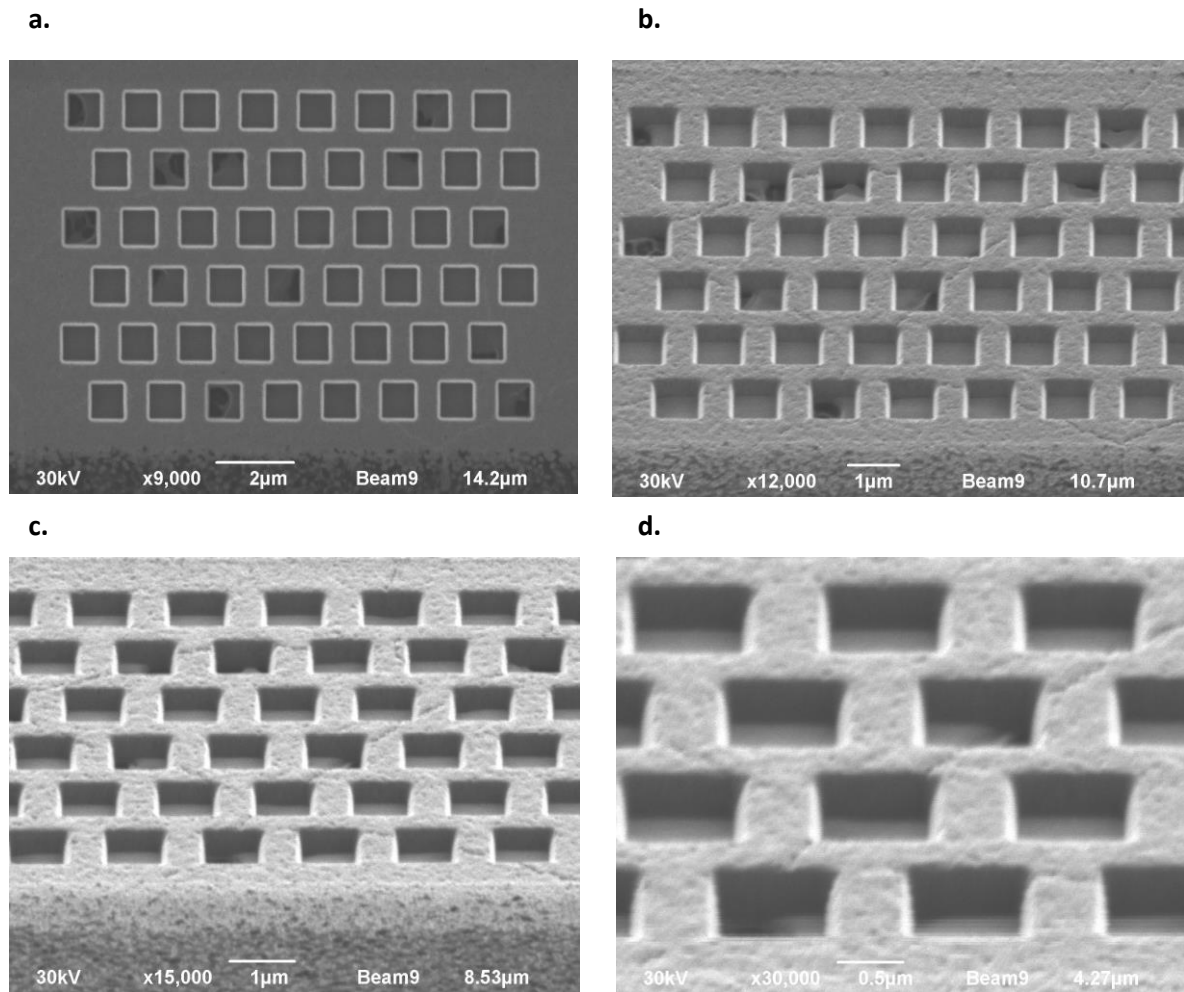


Figura 28. Micrografía FIB de: a) Vista superior de la estructura triangular con orificios cuadrados, esculpida en silicio recubierto de zirconia. b) Vista a 45° de la estructura. c) Vista a 60°, desde este ángulo se puede observar con mayor claridad la profundidad de los orificios perforados y d) Acercamiento de la vista a 60°.

Posteriormente, se diseñó un cristal fotónico en un sustrato de silicio (Si), donde se perforan orificios cuadrados de 1 μm x 1 μm con una periodicidad $a=1.5\mu\text{m}$,

formando una red cuadrada que cubre un área aproximada de $90\ \mu\text{m} \times 90\ \mu\text{m}$. La profundidad de cada orificio fue de $1\ \mu\text{m}$. Para lograrlo, se consideró aplicar una corriente de iones $I_p=300\ \text{mA}$ durante 10 segundos. Además, fue necesario agregar una capa de un material conductor, como protección del sustrato para evitar un daño sobre el material de trabajo, e.g. erosión no deseada [14, 33]. Para este efecto, se agregó una película delgada de óxido de zinc (ZnO) de $\sim 300\text{nm}$ de espesor sobre el sustrato. El depósito de esta película delgada se realizó en las instalaciones del laboratorio de películas delgadas de CIMAV. La Figura 29 muestra el diseño del cristal fotónico que se fresó sobre silicio. En la Figura 30 se muestra un esquema de la sección transversal diseñada, donde se incluye la presencia del recubrimiento de ZnO sobre el Si.

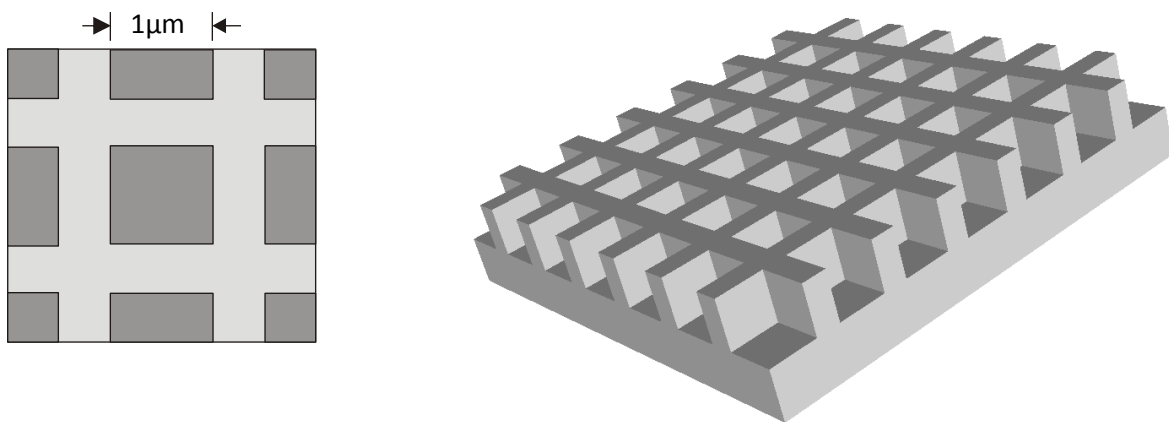


Figura 29. Diseño de cristal fotónico con sustrato de silicio y orificios cuadrados de $1\ \mu\text{m}$ por lado y profundidad de $1\ \mu\text{m}$, en una estructura cuadrada.

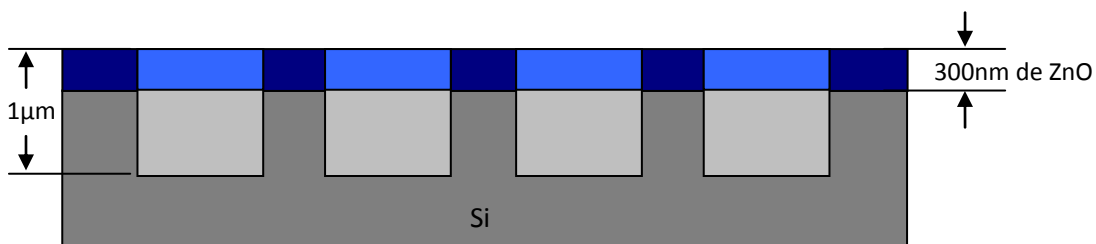


Figura 30. Perfil del diseño del cristal fotónico ilustrando el espesor del recubrimiento de ZnO.

La Figura 31 ilustra una micrografía FIB del cristal fotónico que se logró fabricar utilizando las condiciones y materiales de diseño. El tiempo total de maquinado de este cristal fotónico fue de ~30 horas, bajo las condiciones descritas anteriormente. Para reducir el tiempo de maquinado sería necesario incluir un gas de arrastre [14, 31, 32]. Si solo se empleara una corriente de iones mayor, ésta solo incrementaría la redeposición de material en los orificios perforados [6, 7, 14].

Para construir la estructura mostrada en la Figura 31, fue necesario realizar el maquinado en secciones. Estas secciones constan de bloques de 6 x 7 orificios cada una. Estos bloques se maquinaron secuencialmente durante su fabricación de tal forma que coincidieran con el diseño (1 μm de lado y 1.5 μm de periodicidad). Esto deriva en imprecisión del maquinado, debido a que el posicionamiento de los orificios es dependiente del usuario del equipo, así como de la calibración del FIB. El cristal fotónico fue construido bajo estas condiciones, considerando que el maquinado de orificios muy pequeños (con respecto al campo de visión) es muy impreciso. Esto provoca un mal posicionamiento de los orificios, así como deformación de la geometría original. Dicha condición hace que el fresado de toda la estructura en una sola corrida se dificulte. Por esta razón, se decidió hacer el ensamble de bloques como se describió anteriormente, para lograr una estructura con orificios bien perfilados y con poca variación en la posición. Utilizando este método, se logró construir un cristal fotónico de buena calidad y de dimensiones comparables a las descritas en la literatura reciente.

Con esto se comprobó que es posible fabricar cristales fotónicos en dimensiones micrométricas con el equipo de haz enfocado de iones, disponible en las instalaciones del Laboratorio Nacional de Nanotecnología en CIMAV.

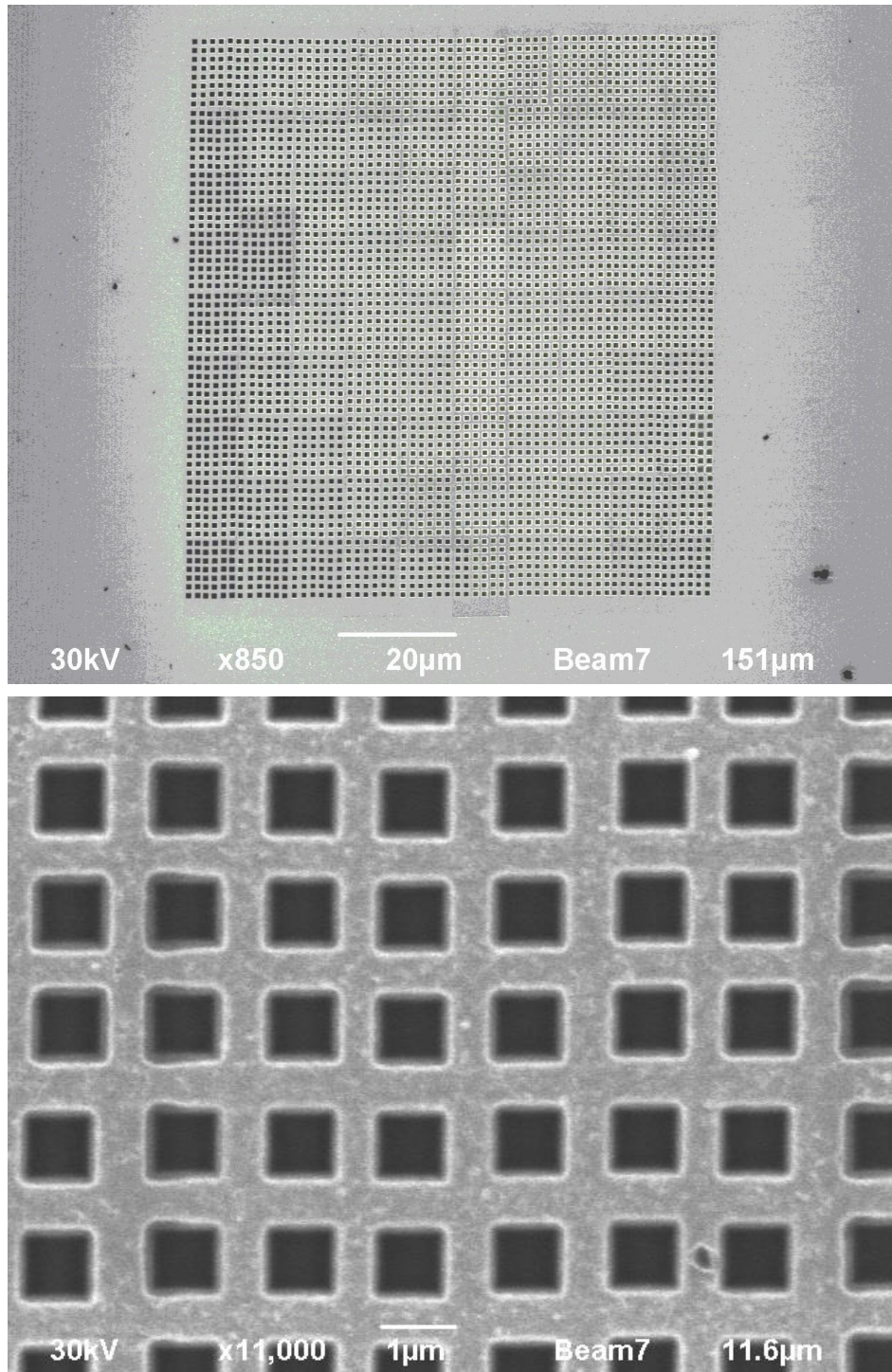


Figura 31. Cristal fotónico maquinado en un sustrato de silicio con recubrimiento de ZnO de ~300 nm de espesor, con orificios cuadrados de 1 μm por lado y profundidad de 1 μm y estructura de red cuadrada.

IV.1.2 Fabricación de cristal fotónico de orificios circulares.

El siguiente paso, fue diseñar y construir cristales fotónicos con orificios circulares en un sustrato de silicio recubierto con una película delgada de ZnO de ~240 nm de espesor, como se ilustra en la Figura 32. Esto representó un reto mayor, debido a que el equipo FIB disponible sólo tiene la capacidad de construir cajas, líneas y puntos (spots), como geometrías disponibles para realizar el micro-maquinado.

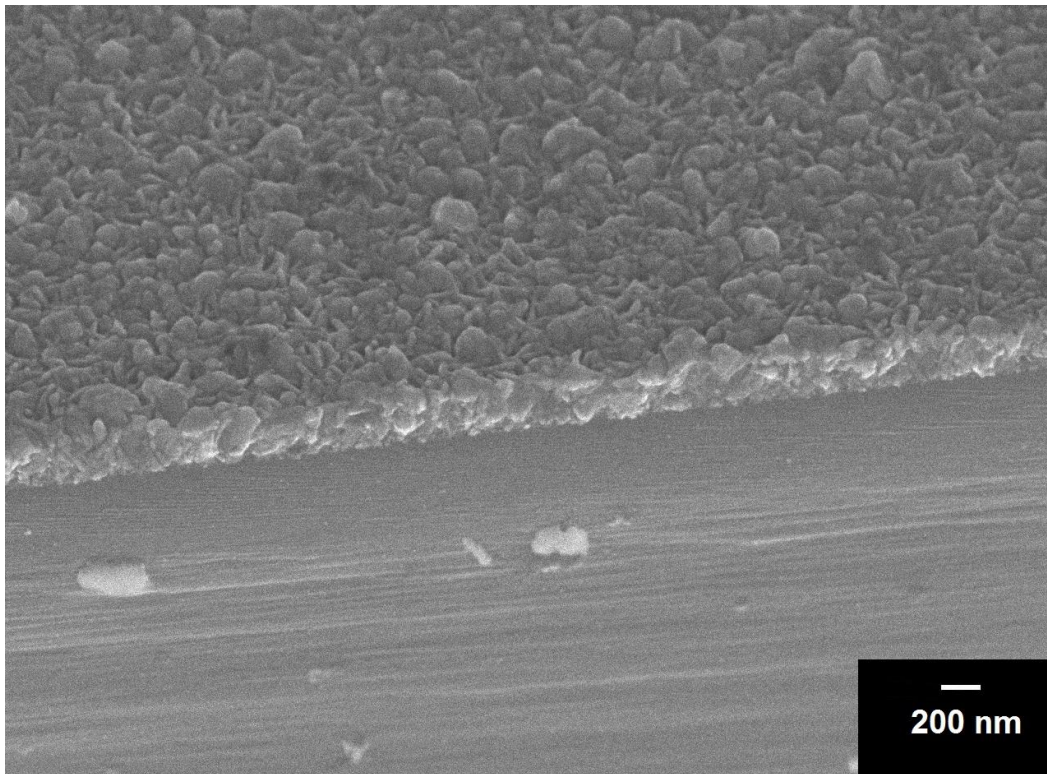


Figura 32. Micrografía de un corte transversal al sustrato de silicio recubierto con una película delgada de óxido de zinc.

Para resolver esta situación, se corrieron experimentos utilizando la opción de erosión de “spot”. Esta “geometría” es no controlada, debido a que un “spot” en el FIB varía su geometría al utilizar diferentes condiciones de erosión. Las variables como la

corriente de iones, dosis de carga eléctrica por área, magnificación, voltaje de la columna de iones y tiempo de exposición deben controlarse, para producir un orificio circular. Además, debe asegurarse una buena conexión eléctrica entre la superficie del sustrato y el porta-muestras en el FIB, para lograr un buen enfoque en el haz de iones.

Después de experimentar con diversas condiciones de erosión en los materiales descritos, se logró construir un cristal fotónico con orificios circulares de ~ 500 nm de diámetro y una constante de red a aproximada a $1 \mu\text{m}$. Para lograr la estructura mencionada fue necesario emplear una corriente de iones de 1000pA , una dosis de $200\mu\text{C}/\mu\text{m}^2$, $26\ 600\text{V}$ en la columna de iones y un tiempo de exposición del haz de 15 segundos por orificio.

La Figura 33 muestra un acercamiento a los orificios maquinados utilizando los parámetros descritos anteriormente. En esta figura se puede confirmar que es posible fabricar cristales fotónicos con orificios circulares utilizando en equipo FIB de CIMAV.

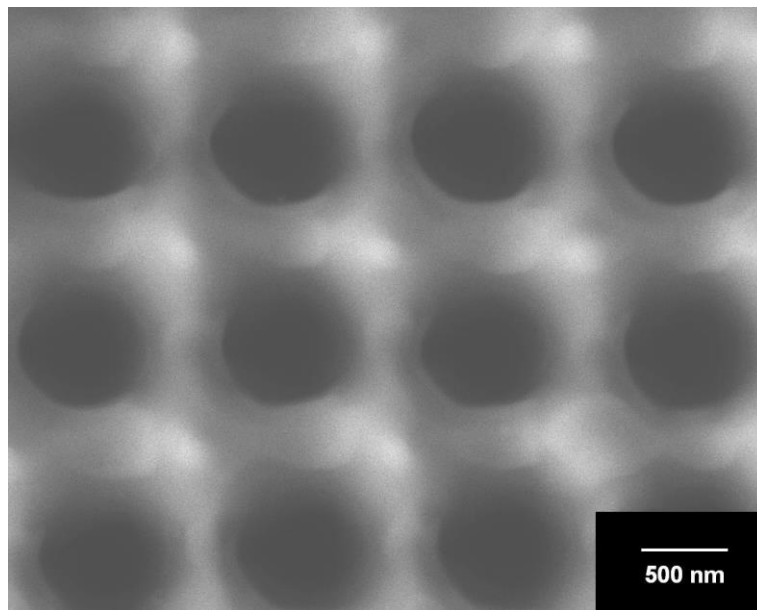


Figura 33. Micrografía SEM de un cristal fotónico con orificios circulares y red cuadrada de periodicidad $a \approx 1 \mu\text{m}$, maquinado en equipo de haz enfocado de iones en CIMAV.

El estudio de estos materiales se llevó a cabo con la fabricación de tres cristales fotónicos con orificios circulares y red cuadrada como la descrita en la Figura 33. Las muestras diseñadas incluyen una red cuadrada de micro-cavidades ópticas cuasi-circulares, embebidas dentro de la red del cristal fotónico. Cada una de las muestras cuenta con una densidad diferente de micro-cavidades ópticas, las cuales se describen como: a) sin cavidades, b) 16 cavidades y c) 36 cavidades respectivamente. Todas las muestras fueron fabricadas en el equipo FIB de CIMAV bajo las condiciones descritas anteriormente, para efectos de este proyecto de investigación.

IV.2 Caracterización óptica de los cristales fotónicos.

La caracterización óptica de las estructuras fotónicas fabricadas tuvo lugar en las instalaciones del laboratorio de propiedades ópticas de CIMAV. Para este efecto, se utilizó un láser multicanal de fibra óptica Thorlabs MCLS1, con longitudes de onda 785 nm, 852 nm y 1550 nm. El haz de luz fue linealmente polarizado a 0° (en la dirección vertical) para hacerlo incidir sobre las muestras de estudio. La detección de la señal reflejada por las estructuras fotónicas se realizó con un analizador de espectros Anritsu MS9740A, capaz de detectar señales ópticas desde 630 nm hasta $1.75 \mu\text{m}$. Para realizar la caracterización óptica de los cristales fotónicos construidos se utilizó un arreglo experimental similar al que se muestra en la Ref. [34], ilustrado en la Figura 34.

En el desarrollo de la medición de la reflectancia de las estructuras fotónicas, la luz se polarizó a 0° y se enfocó con una lente óptica convergente biconvexa con recubrimiento anti-reflejante VIS-NIR (visible e infrarrojo cercano), sobre la superficie de las estructuras fotónicas bidimensionales. La luz reflejada se recolectó a través de la misma lente convergente para ser dirigida a un polarizador a 90° , respecto a la polarización incidente y después enfocada a un puerto de fibra óptica, conectada al analizador de espectros.

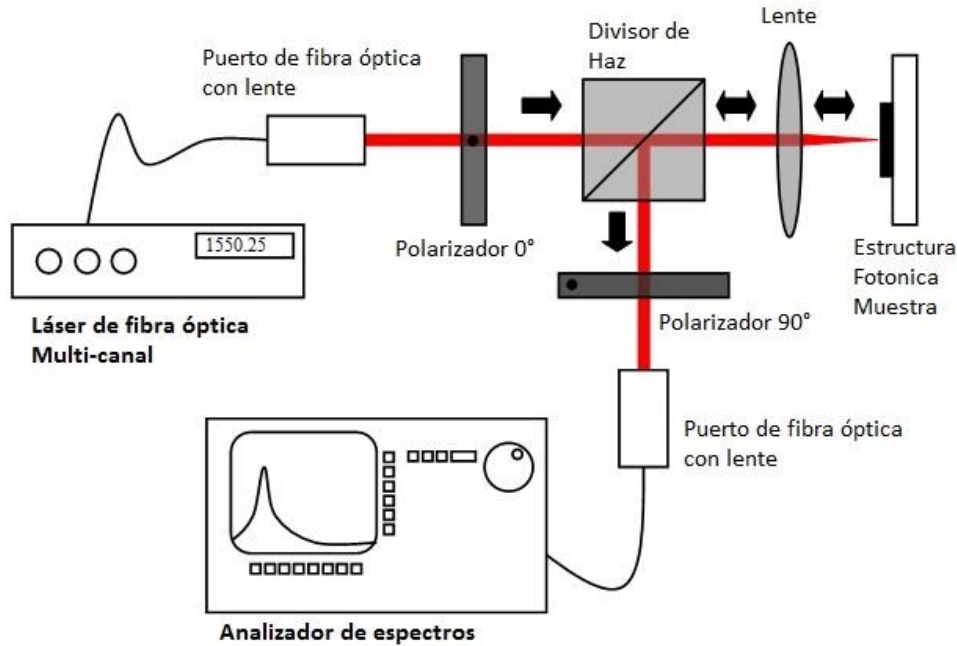


Figura 34. Esquema del arreglo experimental para medir la reflectancia de los cristales fotónicos a ángulo de incidencia normal.

Las muestras se montaron en una platina de traslación lineal con ajuste micrométrico en las direcciones x-y, para colocarlas en el foco de la lente óptica. Esto, para asegurar que el “spot” o diámetro del haz de luz más pequeño incida dentro de la estructura fotónica, sin tocar los bordes o alguna porción del sustrato de Si-ZnO y obtener así una medición de reflectancia precisa exclusiva del cristal fotónico. Se midió la reflectancia para las dos polarizaciones TE y TM (polarización vertical y horizontal respectivamente) para determinar la sensibilidad a la polarización en las estructuras fotónicas construidas.

A efecto de determinar si el haz de luz de prueba utilizado en la caracterización óptica fuera tan pequeño o más pequeño que la estructura fotónica se midió el diámetro que, resultó de $\sim 15 \mu\text{m}$ para la longitud de onda de 852 nm, como lo muestra la Figura

35. De esta forma, el perfil del haz de luz láser cubrió completamente el área definida por el cristal fotónico. El perfil espacial del haz de luz con longitud de onda de 785 nm muestra las mismas dimensiones que el haz de 852 nm de longitud de onda. El perfil del haz de luz de 1552 nm de longitud de onda no pudo ser observado, debido a que el equipo Beam Master Knife utilizado puede detectar sólo longitudes de onda menores a 1000 nm. Sin embargo, es muy factible que el diámetro efectivo correspondiente a ésta longitud de onda sea de menores dimensiones que el área del cristal fotónico. Esto, basado en los resultados obtenidos al caracterizar los cristales fotónicos, bajo la incidencia de este haz con esta longitud de onda.

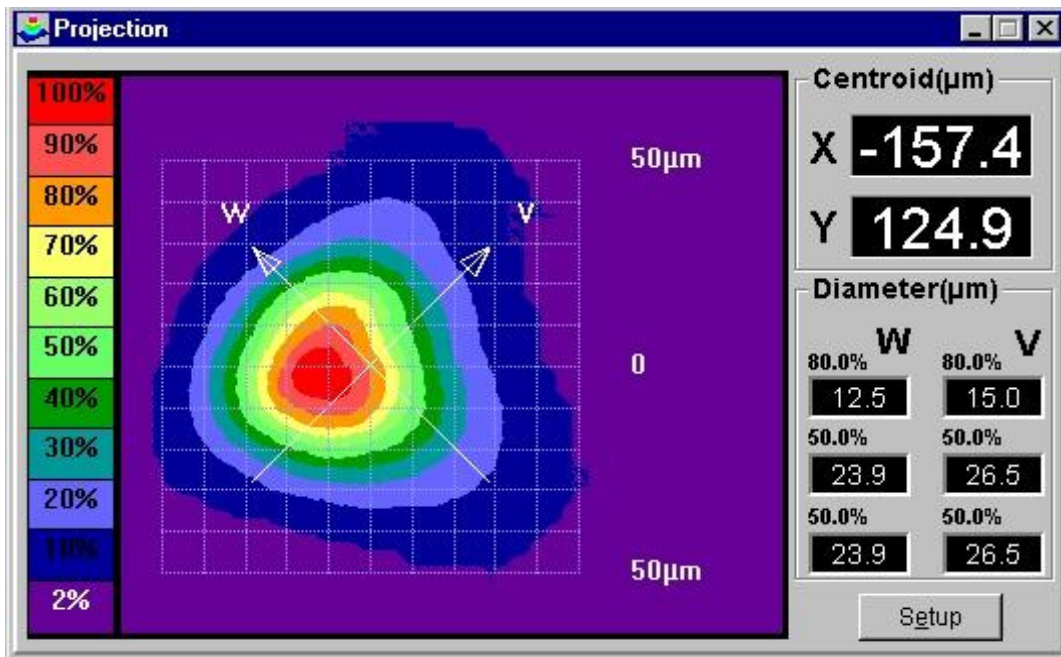


Figura 35. Perfil espacial del spot del haz de luz láser de 852 nm de longitud de onda, empleado en la caracterización óptica de los cristales fotónicos fabricados en CIMAV.

Las mediciones de reflectancia óptica se llevaron a cabo antes y después de remover la película delgada de óxido de zinc, depositada sobre el sustrato que alberga

las estructuras fotónicas. Esto con el propósito de determinar la participación del ZnO en las propiedades ópticas de la hetero-estructura fotónica Si-ZnO. Inclusive para este fin, tanto un sustrato de Si como el sistema Si-ZnO fueron caracterizados ópticamente, al medir su reflectancia de forma continua con un espectrofotómetro Varian Cary 5000, para identificar las reflectancias, base de referencia en este estudio.

CAPITULO V

RESULTADOS

V.1 Fabricación y caracterización estructural de los cristales fotónicos.

El primer cristal fotónico fabricado en el sistema Si-ZnO descrito anteriormente, cuenta con orificios circulares de ~500 nm de diámetro y una constante de red de ~1 μm , cubriendo un área de ~80x80 μm^2 . Este cristal fotónico no presenta microcavidades ópticas y funge como referencia en cuanto a propiedades ópticas, respecto a los otros cristales fotónicos fabricados. Para cubrir el área deseada fue necesario maquinar 6400 orificios. Tomando en cuenta que el maquinado de cada orificio tomó ~15 s, el tiempo de fabricación del cristal fotónico resultó ser de 26.6 horas continuas de maquinado en su totalidad. Debido a la disponibilidad de uso del equipo que nos fue proporcionado, fue necesario emplear varias sesiones de maquinado para completar la estructura. Además, debido a limitaciones del campo de visión del equipo FIB fue preciso fabricar la estructura de 80x80 μm^2 en dos columnas, de manera que cada columna consistió de 80 renglones, con 40 orificios en cada renglón.

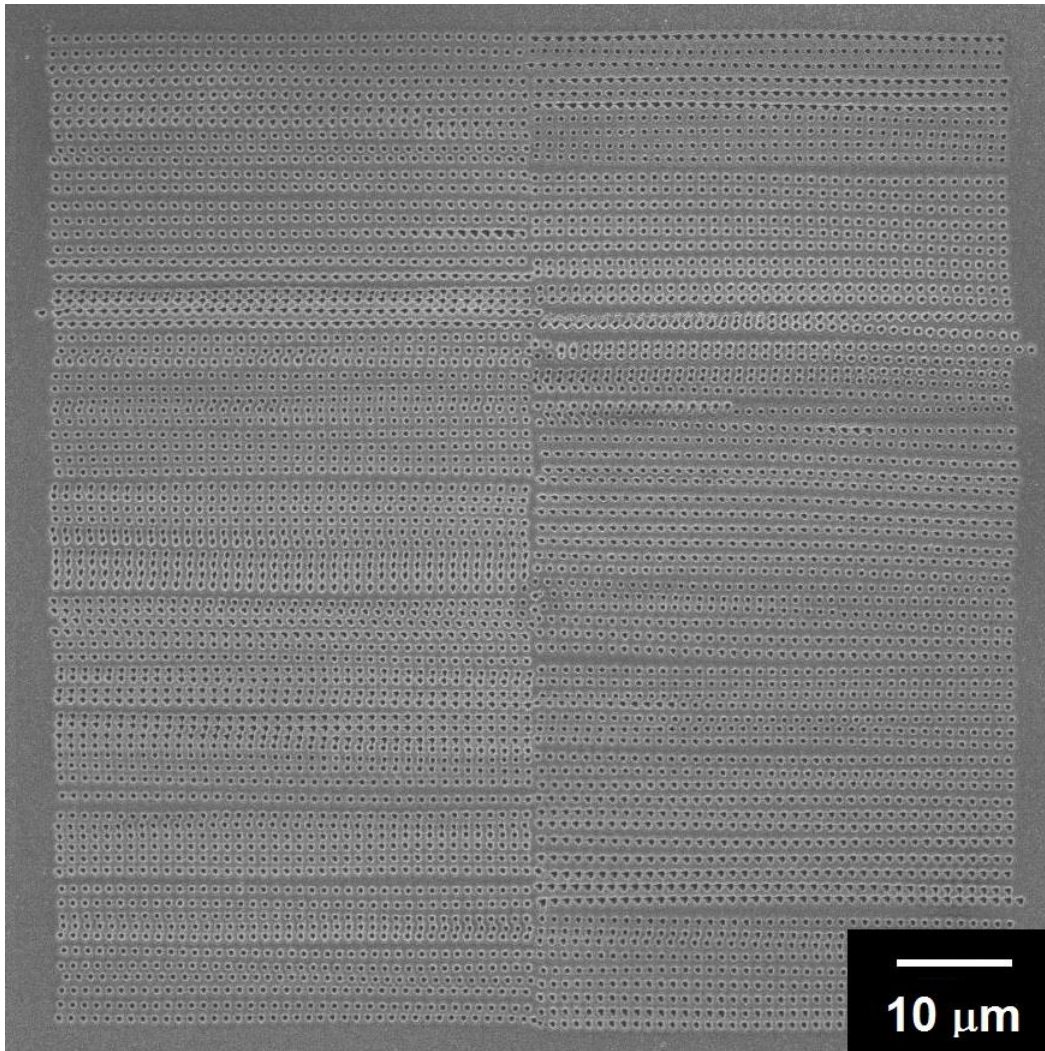


Figura 36. Micrografía SEM del cristal fotónico de orificios circulares de ~ 500 nm de diámetro y constante de red $a=1 \mu\text{m}$.

Empleando el método descrito se obtuvo un buen cristal fotónico con cierta uniformidad aceptable. Sin embargo, se presentaron algunas eventualidades de alineamiento y deformación de la geometría del orificio maquinado, como se observa en la Figura 36. Estos resultados se atribuyen a que el equipo operó en diferentes condiciones de uso, durante las diversas sesiones que se emplearon para completar la construcción de la estructura en su totalidad. Estas condiciones están determinadas por

las horas previas de uso del equipo, así como la contaminación en las lentes de la columna de iones durante el desarrollo de algún otro proceso, por otro grupo de investigación en el FIB. La Figura 37 ilustra la superficie del cristal fotónico a un acercamiento en ángulo diferente al normal. En esta micrografía electrónica de barrido (SEM) de electrones secundarios, se aprecia claramente la redeposición de material erosionado sobre las áreas circundantes a los orificios maquinados. La geometría y posición de los orificios comprueban que el método utilizado es aceptable para la construcción de este tipo de estructuras fotónicas.

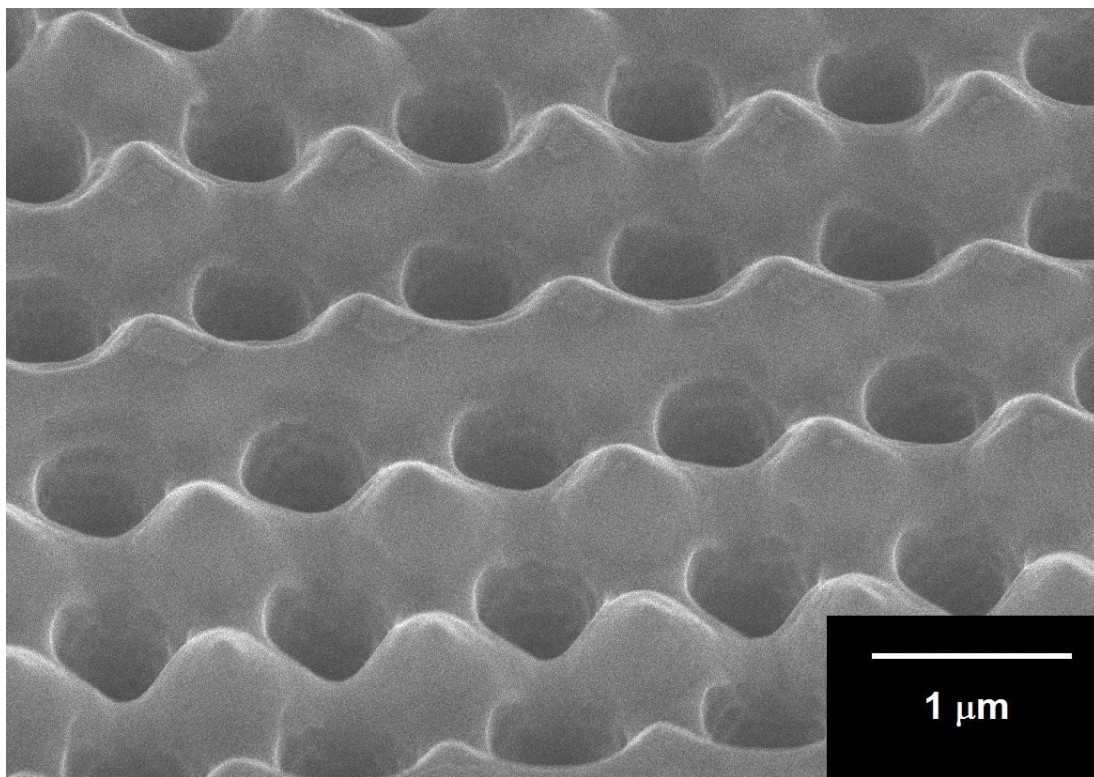


Figura 37. Micrografía SEM del cristal fotónico de orificios circulares. En este acercamiento se observa la geometría de los orificios, así como la redeposición de material erosionado en las áreas adjuntas a los orificios

La Figura 38 muestra una micrografía de la estructura fotónica tomada con un microscopio óptico de 140X de magnificación. En ella, se puede observar el área cubierta por el cristal fotónico en la parte superior derecha de la imagen. Así mismo, se aprecia la dimensión de un cabello humano, colocado en la parte inferior de la micrografía. Cabe destacar que el cristal fotónico fabricado es visible al ojo humano con las condiciones de iluminación adecuadas.

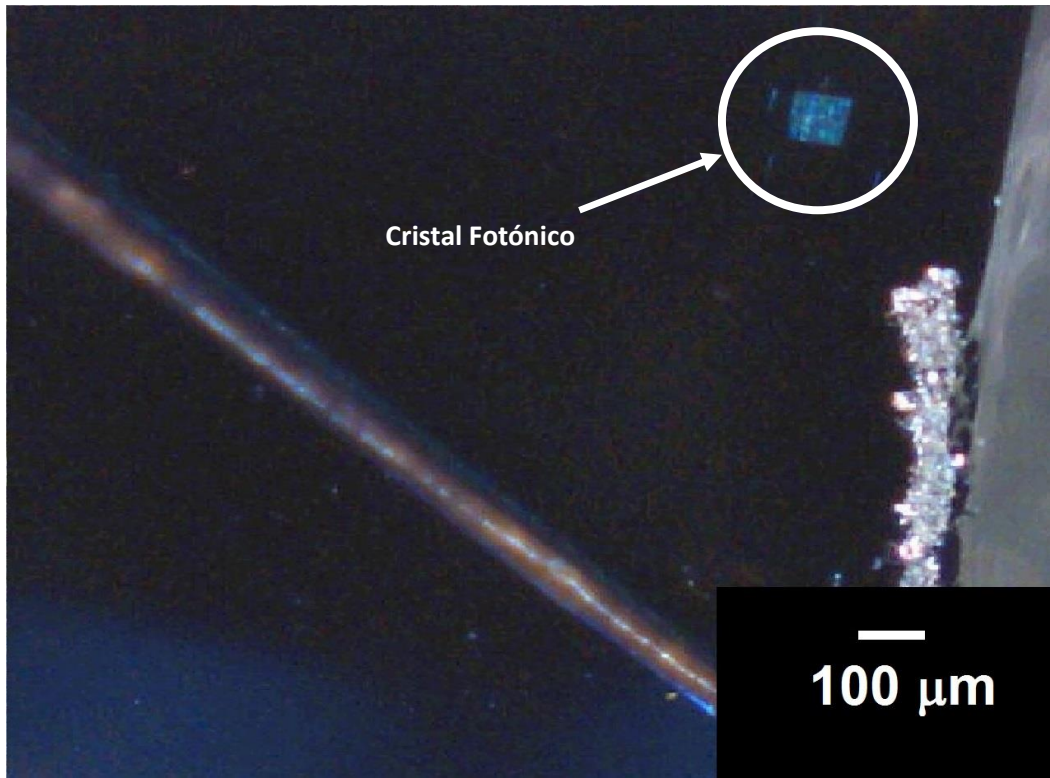


Figura 38. Micrografía del cristal fotónico fabricado tomada con microscopio óptico a 140X de magnificación. Se observa en la esquina superior derecha (encerrada en un círculo) la estructura fotónica y en la parte inferior un cabello humano, como referencia.

Una vez concluida la fabricación del cristal fotónico con orificios circulares, describiendo una red cuadrada, se continuó con la fabricación de tres muestras adicionales en silicio recubierto con una película delgada de ZnO. Se consideraron los mismos parámetros de maquinado en el FIB en las nuevas muestras. También se

conservaron los parámetros como diámetro del orificio maquinado, la periodicidad de la red y el área total del cristal fotónico. El diseño de las nuevas estructuras fotónicas incluye cavidades ópticas, con diferente densidad de cavidades cuasi-circulares por unidad de área: 16 y 36 cavidades respectivamente. Cada cavidad óptica cuenta con un diámetro de $\sim 10 \mu\text{m}$. Estas estructuras se construyeron para desarrollar un diseño de experimentos, y estudiar la influencia de la densidad de cavidades ópticas en la reflectancia de un cristal fotónico. La dimensión de las cavidades se eligió de un orden de magnitud superior a la constante de red del cristal fotónico. Esta dimensión de las cavidades se consideró apta, a efecto de estudiar el comportamiento de la luz ante características de mayor dimensión que la longitud de onda incidente, y también la de los propios orificios, que en la primer muestra describen el arreglo regular de red cuadrada.

La Figura 39 muestra la superficie del cristal fotónico con 16 micro-cavidades ópticas, mientras que la Figura 40 muestra la estructura fotónica con 36 micro-cavidades cuasi-circulares, embebidas dentro del arreglo periódico regular de red cuadrada.

En las Figuras 39 y 40 se puede apreciar que los cristales fotónicos se fabricaron por bloques, en más de una sesión de maquinado en el FIB. Es importante hacer notar que la precisión en la fabricación de estos cristales se vio afectada por la precisión inherente al equipo FIB, para el maquinado de estas dimensiones. También, como ya se comentó anteriormente, la precisión se vio afectada debido a las horas de uso continuo del equipo y por los materiales erosionados previamente, dentro de la cámara de trabajo del equipo de uso compartido en las instalaciones del CIMAV. No obstante, en cada una de las muestras se hizo todo lo posible, adecuando al inicio de cada sesión las condiciones óptimas de maquinado, para obtener la mejor precisión posible. En la Figura 39 se observa una ligera contaminación depositada sobre la estructura fotónica. Este material ajeno a la estructura fue depositado durante el maquinado del cristal fotónico.

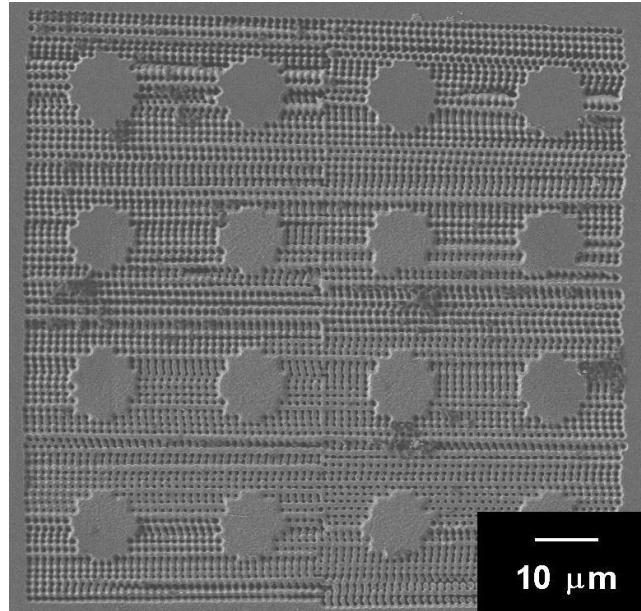


Figura 39. Micrografía de SEM de electrones secundarios del cristal fotónico bidimensional con 16 micro-cavidades ópticas, embebidas en la red periódica del

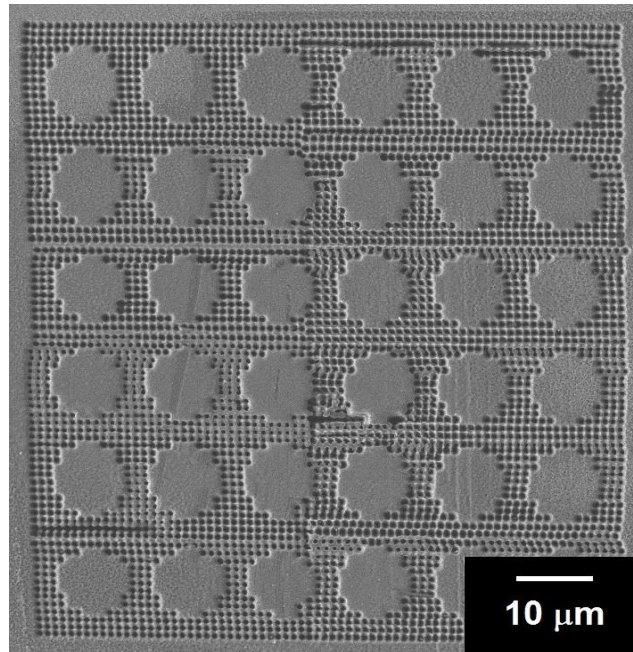


Figura 40. Micrografía de SEM de electrones secundarios del cristal fotónico bidimensional con 36 micro-cavidades ópticas, embebidas en la red periódica del cristal fotónico.

Utilizando el método de fabricación que se ha descrito se logró obtener una profundidad de orificio de 1.5 micras aproximadamente en cada orificio. La Figura 41 muestra la profundidad de los orificios que forman la red periódica del cristal fotónico. Así mismo, se puede observar el efecto de la redeposición de material erosionado en las paredes del orificio, dando lugar a un orificio en forma de cono.

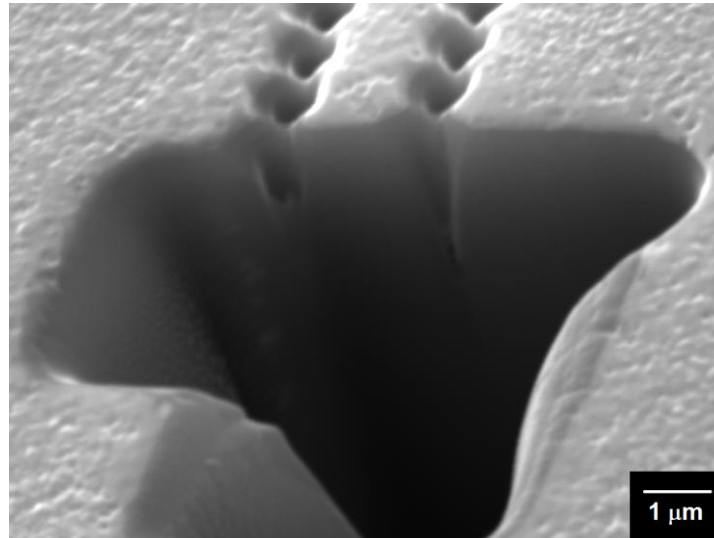


Figura 41. Micrografía SEM de electrones secundarios del corte transversal de los orificios de la red periódica del cristal fotónico, mostrando la profundidad y forma del orificio.

Para finalizar con la fabricación de los cristales fotónicos, una vez medidas sus propiedades de reflectancia óptica, se removió la película delgada de ZnO de las estructuras fotónicas, empleando un baño en ácido acético por 30 minutos. Después de remover el ZnO de la superficie de las estructuras, las muestras se lavaron en un baño ultrasónico en acetona y después en metanol durante 10 minutos por lavado, para eliminar cualquier contaminación remanente. En la Figura 42 se observan los orificios de la red periódica en el sustrato de Si, después de remover el ZnO de la muestra. En esta micrografía se aprecia claramente, que la topografía resultante de la estructura fotónica en silicio es tal como la predicción descrita en la Ref. [35]. La Figura 43 muestra una sección del cristal fotónico con 36 cavidades sin recubrimiento de ZnO.

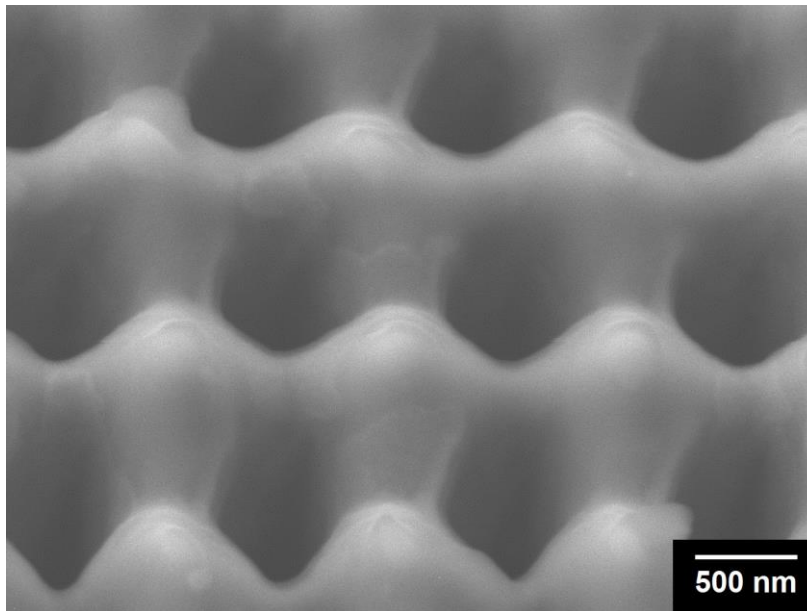


Figura 42. Micrografía SEM de cristal fotónico en silicio puro, después de remover la película delgada de ZnO de la estructura.

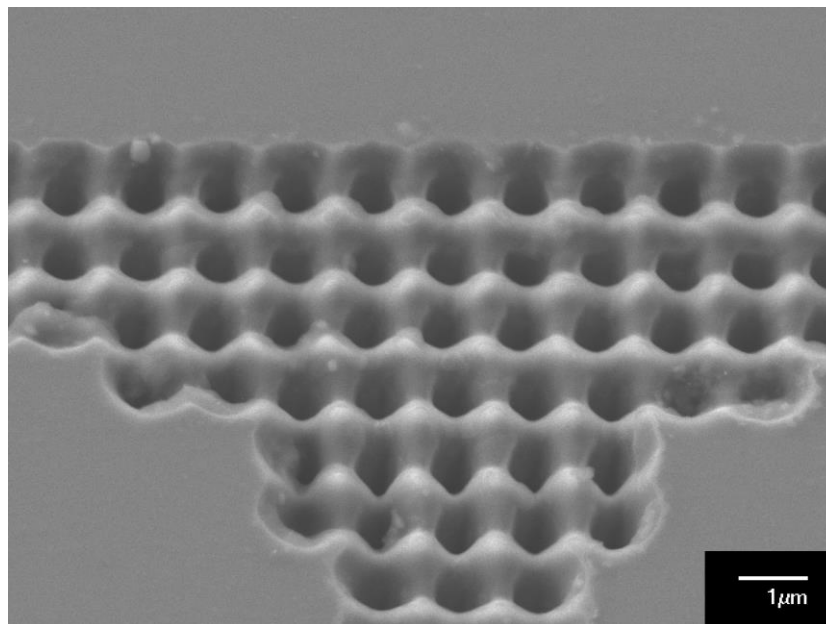


Figura 43. Micrografía SEM de cristal fotónico con 36 micro-cavidades en silicio puro, después de remover la película delgada de ZnO de la estructura.

V.2 Caracterización óptica de los cristales fotónicos.

La caracterización óptica de los cristales fotónicos fabricados en CIMAV se desarrolló con el arreglo experimental descrito en la Figura 34. Primero se realizó la medición de la reflectancia en una muestra del sistema Si-ZnO, sin cristal fotónico como referencia. Posteriormente, se midió la reflectancia en todas las estructuras fotónicas. Esta medición se realizó cuando la película delgada de ZnO aún estaba presente en las estructuras. La medición se tomó en ambas polarizaciones TE y TM (vertical y horizontal respectivamente), para poder determinar el efecto de cada polarización, en cada una de las estructuras fotónicas bajo estudio. La Figura 44 muestra de forma gráfica un resumen de las reflectancias medidas a ángulo normal (ángulo cero), de las estructuras fotónicas para la polarización TE, mientras que la Figura 45 muestra las reflectancias obtenidas en polarización TM para todas las muestras.

De los resultados obtenidos se puede apreciar que existe un incremento en la reflectancia del sistema Si-ZnO, al esculpir un cristal fotónico bidimensional en su superficie. Además, se observa que la presencia de las micro-cavidades, embebidas en el cristal fotónico, induce un corrimiento en el valor máximo de reflectancia en el espectro electromagnético, para ambas polarizaciones. Este corrimiento es dependiente de la densidad de micro-cavidades, presente en la red periódica del cristal fotónico, según se observa en la Figura 45.

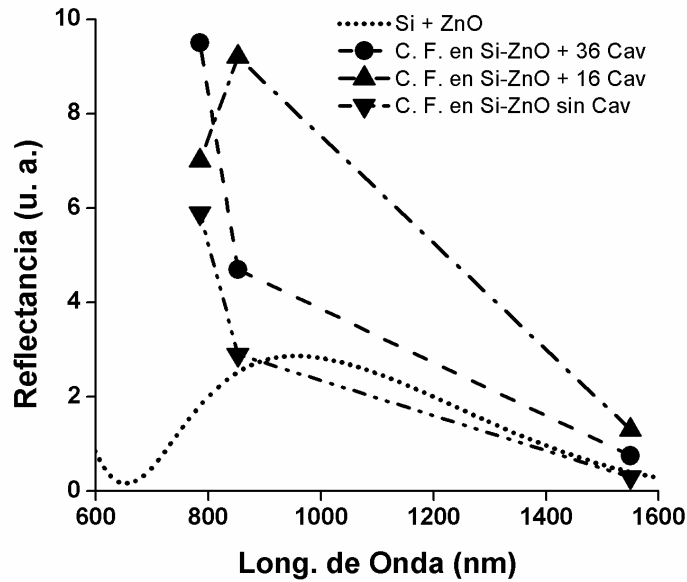


Figura 44. Reflectancia en polarización TE para los cristales fotónicos, con 36 y 16 micro-cavidades y sin micro-cavidades ópticas, cuando la película de ZnO aún está presente en la estructura fotónica.

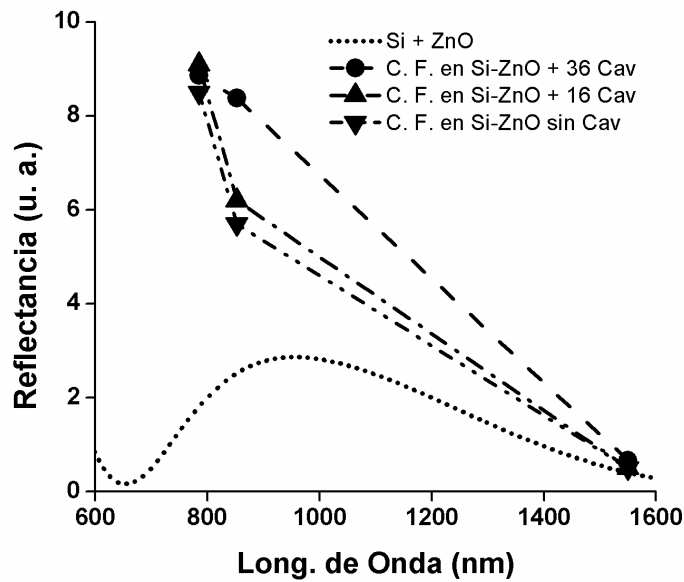


Figura 45. Reflectancia en polarización TM para los cristales fotónicos, con 36 y 16 micro-cavidades y sin micro-cavidades ópticas, cuando la película de ZnO aún está presente en la estructura fotónica.

Una vez concluida la caracterización óptica en las estructuras fotónicas fabricadas en el sistema Si-ZnO, se repitió la experimentación en la estructura con 36 cavidades después de remover la película delgada de ZnO de su superficie. Esto para determinar la participación de la película delgada de ZnO en la reflectancia del cristal fotónico. La Figura 46 y la Figura 47 muestran los resultados de la experimentación antes descrita en el cristal fotónico para las polarizaciones TE y TM respectivamente.

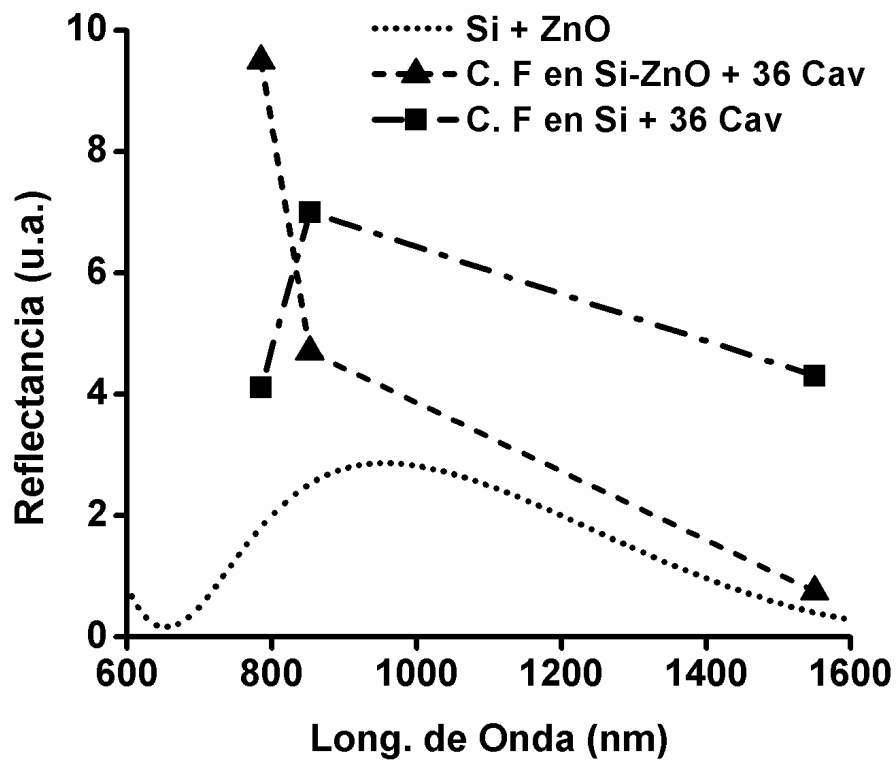


Figura 46. Reflectancia en polarización TE en el cristal fotónico, con 36 cavidades con ZnO en la estructura (triángulos) y sin ZnO en la estructura (cuadros).

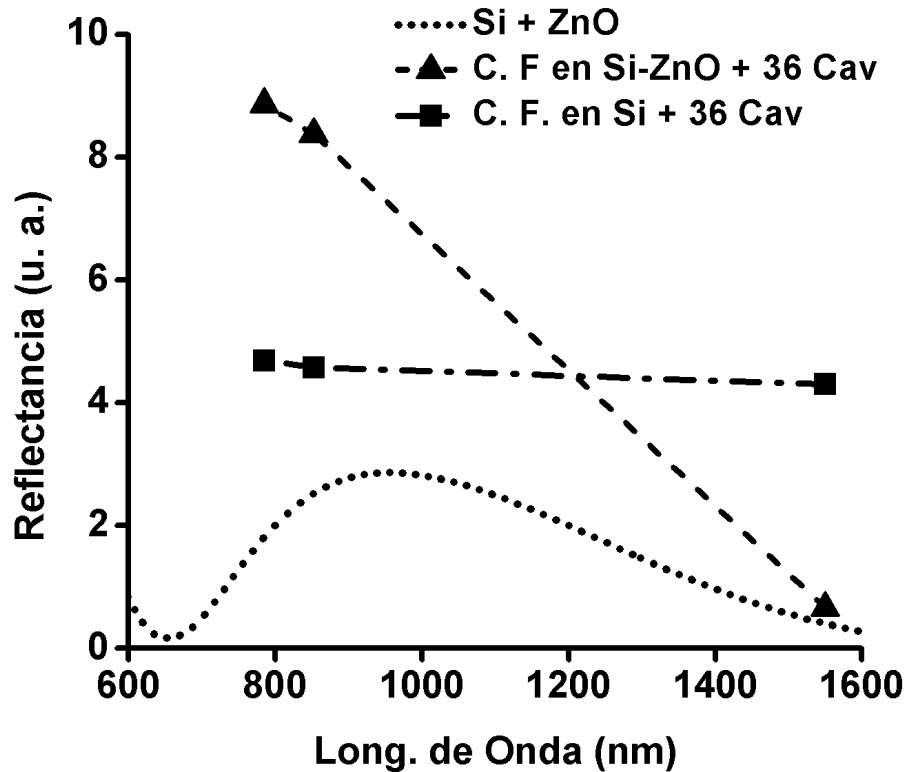


Figura 47. Reflectancia en polarización TM en el cristal fotónico, con 36 cavidades con ZnO en la estructura (triángulos) y sin ZnO en la estructura (cuadros).

Finalmente, se hicieron mediciones adicionales, para garantizar que el punto de luz de prueba utilizado en estos experimentos fuera cubierto en su totalidad por el cristal fotónico. Hicimos desplazar el haz de luz láser a lo largo de la coordenada espacial (eje x) de los cristales fotónicos, para identificar el cambio de reflectancia en las fronteras y dentro del área que define las estructuras fotónicas. La Figura 48 muestra el resultado de la medición de la reflectancia en el experimento realizado en el cristal fotónico con 36 micro-cavidades ópticas, para las longitudes de onda de 785 nm y de 1550 nm. Se utilizó esta muestra por ser la más representativa, por contener la mayor densidad de cavidades ópticas por unidad de área. Además, se seleccionaron

sólo estas dos longitudes de onda, debido a que éstas ofrecieron los puntos de haz de luz de prueba con menor y mayor diámetro en su perfil espacial transversal, respectivamente. Además, esta medición sirvió para determinar si los haces de luz fueron capaces de identificar la variación de la superficie del cristal fotónico, debida a la presencia de las micro-cavidades ópticas cuasi-circulares.

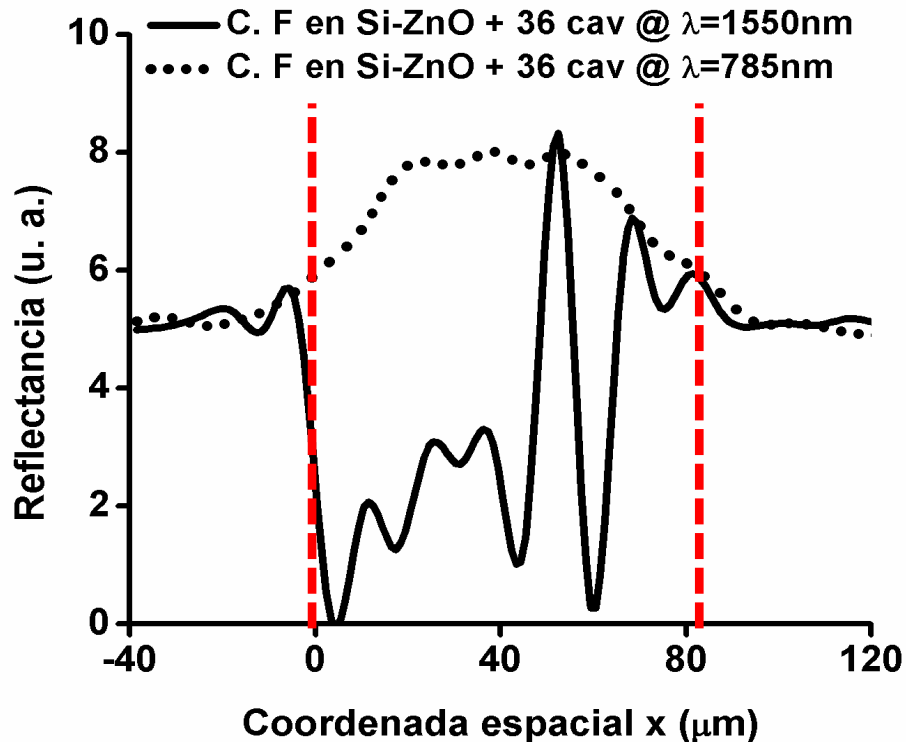


Figura 48. Reflectancia a ángulo normal (ángulo cero) del cristal fotónico de 36 micro-cavidades, a lo largo de la coordenada espacial x.

V.3 Discusión.

En este trabajo de investigación se construyeron 3 hetero-estructuras fotónicas. La primer muestra describe un cristal fotónico bidimensional, con orificios circulares de diámetro ~500 nm, en una red cuadrada maquinada en un sustrato de Si, recubierto con una película delgada de ZnO. Las 2 hetero-estructuras fotónicas adicionales se fabricaron con los mismos parámetros, como el primer cristal fotónico, pero se

incluyeron micro-cavidades ópticas cuasi-circulares en las nuevas estructuras. Estas dos muestras cuentan con 16 y 36 cavidades respectivamente. Las cavidades se diseñaron y construyeron con un diámetro de $\sim 10 \mu\text{m}$ describiendo un patrón de red cuadrada, embebido en una estructura similar a la estructura del cristal fotónico. La dimensión de la micro-cavidad óptica se seleccionó un orden de magnitud mayor que la constante de red del cristal fotónico, para determinar si estas dimensiones son capaces de modificar la propiedad de reflectancia de la hetero-estructura fotónica.

La caracterización óptica de la primer estructura fotónica se desarrolló midiendo la reflectancia de longitudes de onda, en el rango visible a infrarrojo cercano a incidencia normal. Se utilizó un láser multicanal de 785 nm, 852 nm y 1550 nm de longitudes de onda. También, éstas mediciones fueron tomadas para ambas polarizaciones TE y TM, para determinar si la hetero-estructura fotónica es sensible a la polarización de la luz. Se encontró un mejoramiento en el nivel de la reflectancia en estas muestras comparadas con el sistema Si-ZnO, para las longitudes de onda bajas (785 nm y 852 nm), en ambas polarizaciones TE y TM. Además, se encontró que esta estructura es muy sensible a la polarización de la luz, debido a que el nivel de reflectancia mostró ser mayor para la polarización TM que para la polarización TE. Este fenómeno fue confirmado para todas las longitudes de onda probadas como lo describen la Figura 44 para la polarización TE y la Figura 45 para la polarización TM, respectivamente.

Las dos estructuras con micro-cavidades fueron caracterizadas ópticamente de la misma forma que el primer cristal fotónico, construido con el propósito de identificar la influencia de las micro-cavidades, embebidas en la estructura fotónica. Las mediciones de reflectancia de estas hetero-estructuras fotónicas revelaron una gran influencia en el nivel de reflectancia, para todas las longitudes de onda que se probaron. De hecho, contrario a lo que se pensó, estas micro-cavidades mostraron una mayor influencia en la reflectancia para longitudes de onda visible, que para las longitudes de onda del infrarrojo cercano en la hetero-estructura.

Una vez que las mediciones de reflectancia en las hetero-estructuras fotónicas se completaron, se removió la película delgada de ZnO en la muestra con 36 cavidades, para evaluar su contribución a la reflectancia total de la estructura fotónica. Como siguiente paso, se realizaron mediciones de reflectancia en el cristal fotónico, que quedó expuesto en silicio después de remover la película delgada de ZnO. Las mediciones se realizaron para las mismas longitudes de onda utilizadas en la caracterización óptica de la hetero-estructura. Estas mediciones mostraron que la reflectancia del cristal fotónico en silicio es menor que la reflectancia registrada para el cristal fotónico en Si-ZnO. Por lo tanto, se encontró una contribución importante de la película delgada de ZnO poli-cristalino en la modulación de la reflectancia, en este tipo de estructuras. Sin embargo, este comportamiento de la película de ZnO fue opuesto a lo esperado usualmente, debido a que el ZnO es un material anti-reflejante, y en éste caso, este participó en el incremento de la reflectancia.

Para completar el estudio, se removió la película de ZnO de la superficie de los cristales fotónicos. Las mediciones ópticas se repitieron en la estructura sin cavidades y en la estructura con 36 cavidades. Esto, para identificar la influencia de las micro-cavidades, embebidas en el cristal fotónico en silicio. Los resultados de la muestra sin cavidades mostraron una reducción significativa en el nivel de reflectancia, para longitudes de onda pequeñas, con respecto a la reflectancia medida en las hetero estructura. Este resultado confirma una fuerte influencia de la película de ZnO en la modulación de la reflectancia en estructuras fotónicas, con características como las descritas en este trabajo de investigación. Sin embargo, en la muestra con 36 cavidades la película delgada de ZnO incrementó la reflectancia para longitudes de onda cercanas a la constante de red del cristal fotónico, para la polarización TE. Por otra parte, para la polarización TM se observó un incremento en la reflectancia para longitudes de onda mayores, específicamente a 1550 nm, después de remover la película delgada de ZnO.

Finalmente, en la Figura 48 se observa claramente cómo la estructura fotónica muestra dos comportamientos diferentes, para las longitudes de onda en el borde del rango visible y las del rango infrarrojo cercano. Se observa una ganancia en la reflectancia para las longitudes de onda en el borde del rango visible, y por otra parte, se observa también un comportamiento de anti-reflexión, para las longitudes de onda del rango infrarrojo cercano. Además, una característica sobresaliente importante de mencionar, es que las longitudes de onda del infrarrojo cercano son sensibles al patrón de micro-cavidades ópticas, embebidas en el cristal fotónico, mientras que las longitudes de onda visible no lo son. Las longitudes de onda al borde del rango visible perciben la estructura fotónica con micro-cavidades, como un material continuo sin defectos, al hacer cruzar el punto de luz de prueba a lo largo de la coordenada espacial x , en el cristal fotónico.

CONCLUSIONES

Basándose en los resultados obtenidos, podemos concluir que es posible fabricar cristales fotónicos 2D con dimensiones cercanas a las nanométricas empleando el equipo JEOL JEM9320-FIB de CIMAV. Las estructuras fotónicas que pueden obtenerse con la metodología de fabricación propuesta en este trabajo de investigación es bastante buena y competitiva, en el área de los cristales fotónicos reportados en la literatura reciente. Adicionalmente, las estructuras propuestas y analizadas en este trabajo son únicas, debido a que aun cuando se encuentra literatura sobre micro-cavidades ópticas, no se han reportado investigaciones sobre un patrón de micro-cavidades embebidas en una estructura fotónica. Por otra parte, es importante destacar que para maquinarse orificios circulares, fue necesario utilizar la modalidad de maquinado con geometría de “spot” en el FIB, así como controlar la corriente de iones, de acuerdo a la consistencia mecánica del sustrato Si-ZnO, para que el orificio resultante fuera un círculo.

Por otra parte, las hetero-estructuras fotónicas, construidas y caracterizadas en este trabajo de investigación, pueden modular la reflectancia a incidencia normal. Además, mejoran la propiedad de reflectancia para las longitudes de onda en el borde del rango visible, debido a la presencia de la película delgada de ZnO. Adicionalmente, al incluir un patrón de micro-cavidades ópticas, en la red de la estructura fotónica, ayuda en la modulación de la reflectancia, así como en el desplazamiento del nivel máximo de reflectancia hacia longitudes de onda en el borde del rango visible. También, es notable que todas las estructuras fotónicas, construidas y estudiadas en

este trabajo de investigación, mostraron una sensibilidad significativa a la polarización a la luz incidente. Esto, de acuerdo a los resultados obtenidos en las mediciones realizadas en cada estructura fotónica, para la polarización TE y la polarización TM. Estos resultados pueden sugerir el uso de estos cristales fotónicos en espejos de alta reflectancia, para longitudes de onda visible sensibles al estado de polarización de la luz.

REFERENCIAS

- [1] J. P. Vigneron, P. Simonis, Natural Photonic Crystal, *Physica B* Volume 407, 20, (2012) 4032–4036
- [2] E. Yablonovitch, Inhibited Spontaneous Emission in Solid-state Physics and Electronics, *Phys. Rev. Lett.* 58 (1987) 2059-2062
- [3] S. John, Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices, *Phys. Rev. Lett.* 58 (1987) 2486-2489
- [4] E. Yablonovitch, T. J. Gmitter, K. M. Leung, Photonic band structure: The face-centered-cubic case employing nonspherical atoms, *Phys. Rev. Lett.* 67 (1991) 2295.
- [5] D. W. Prather, S. Shi, A. Sharkawy, J. Murakowski, G. J. Schneider. “Photonic Crystals: Theory, Applications, and Fabrication” (John Wiley & Sons, Inc., 2009)
- [6] V. Mizeikis, S. Juodkazis, A. Marcinkevicius, S. Matsuo, H. Misawa, Tailoring and characterization of photonic crystals. *J. Photoch. Photobio. C* 2 (2001) 35–69
- [7] I. A. Sukhoivanov, I. V. Guryev, *Photonic Crystals: Physics and Practical Modeling* (Springer, Heidelberg, 2009)
- [8] E. Yablonovitch, Photonic crystals: what’s in a name? *OPN* 18, 12-13, March 2007
- [9] J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, R. D. Meade, J. N. Winn, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* (Second Edition) (Princeton University Press, 2008)
- [10] C. Jamois, R. B. Wehrspohn, L. C. Andreani, C. Hermann, O. Hess, U. Gösele, Silicon-based two-dimensional photonic crystal waveguides, *Photonics Nanostruct* 1 (2003) 1-13
- [11] D. Englund, D. Fattal, E. Waks, G. Solomon, et al., Controlling the spontaneous emission rate of single quantum dots in a two-dimensional photonic crystal. *Phys. Rev. Lett.* 95, 013904, 3 p. (2005)
- [12] N. Hauke, T. Zabel, K. Müller, M. Kaniber, A. Laucht, D. Bougeard, G. Abstreiter, J. J. Finley, Y. Arakawa, Enhanced photoluminescence emission from two-

dimensional silicon photonic crystal nanocavities, *New J. Phys.* 12 (2010) 053005 (8pp)

- [13] P. Viktorovitch, E. Drouard, M. Garrigues, J. L. Leclercq, X. Letartre, P. Rojo, C. Seassal, Photonic crystals: basic concepts and devices. *C. R. Phys.* 8 (2007) 253-266
- [14] X. Xu, H. Chen, Zhigang Xiong b, A. Jin, C. Gu, B. Cheng, D. Zhang, Fabrication of photonic crystals on several kinds of semiconductor materials by using focused-ion beam method. *Thin Solid Films* 515 (2007) 8297–8300
- [15] C. Tsai, L. Liao, Y. Luo, P. Chao,* , E. Chen, H. Meng, W. Chen, S. Lin, C. Lin. Optimal design and fabrication of ITO/organic photonic crystals in polymer light-emitting diodes using a focused ion beam. *Microelectron. Eng.* 87 (2010) 1331–1335
- [16] T. F. Krauss, R. M. De La Rue, Photonic crystals in the optical regime — past, present and future , *Prog. Quant. Electron.* 23, 51-96 (1999)
- [17] B. Chen, T. Tang, H. Chen, Study on a compact flexible photonic crystal waveguide and its bends. *Opt. Express* 17(7), 5033–5038 (2009)
- [18] S. Asefa, S. J. McNab, Y. A. Vlasov, Transmission of slow light through photonic crystal waveguide bends. *Opt.Lett.* 31(6), 745–747 (2006)
- [19] M. K. Moghaddam, M. M. Mirsalehi, A. R. Attari. A 60° photonic crystal waveguide bend with improved transmission characteristics. *Opt. Appl., Vol. XXXIX, No. 2,* 307-317, 2009
- [20] P. M. Nellen, P. Strasser, V. Callegari, R. Wuest, D. Erni, F. Robin. Focused ion beam modifications of indium phosphide photonic crystals. *Microelectron. Eng.* 84 (2007) 1244–1247.
- [21] Zh. Liu, S. Durant, H. Lee, et al., Experimental studies of far-field superlens for sub-diffractive optical imaging. *Opt. Express* 15(11), 6947–6954 (2007)
- [22] D. Bernier, X. Le Roux, A. Lupu, et al., Compact, low cross-talk CWDM demultiplexer using photonic crystal superprism. *Opt. Express* 16(22), 17209–17214 (2008)
- [23] I. V. Guryev, J. A. A. Lucio, O. G. I. Manzano, E. A. Mendez, Optical power limiter on the basis of 2D photonic crystal. *Int. Conf. Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL 2008, Crimea, Ukraine,* 180–182 (2008)
- [24] J. S. Sanghera, L. B. Shaw, I. D. Aggarwal, Chalcogenide glass-fiber-based Mid-IR sources and applications. *IEEE J. Select. Top. Quantum. Electron.* 15(1), 114–119 (2009)
- [25] J. Ju, W. Jin, H. L. Ho, Compact in-fiber interferometer formed by long-period gratings in photonic crystal fiber. *IEEE Photon. Tehcnol. Lett.* 20(23), 1899–1901 (2008)

- [26] M. Fujita, Y. Tanaka, S. Noda, Light emission from silicon in photonic crystal nanocavity. *IEEE J. Select. Top. Quant. Electron.* 14(4), 1090–1097 (2008)
- [27] C. Karnutsch, M. Stroisch, M. Punke, U. Lemmer, T. J. W. Weimann, Laser diode-pumped organic semiconductor lasers utilizing two-dimensional photonic crystal resonators. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 19(10), 741–743 (2007)
- [28] S. Boutami, B.B. Bakir, J.-L. Leclercq, X. Letartre, C. Seassal, P. Rojo-Romeo, P. Regreny, M. Garrigues, P. Viktorovitch, Photonic crystal-based MOEMS devices. *IEEE J. Select. Top. Quant. Electron.* 13(2), 244–252 (2007)
- [29] Y. Lin, A. Harb, K. Lozano, D. Xu, and K. P. Chen, Five beam holographic lithography for simultaneous fabrication of three dimensional photonic crystal templates and line defects using phase tunable diffractive optical element. (C) 2009 OSA 14 September 2009 / Vol. 17, No. 19 / *OPT. EXPRESS* 16625
- [30] H. Masuda, H. Yamada, M. Satoh, H. Asoh, M. Nakao, T. Tamamura. Highly ordered nanochannel-array architecture in anodic alumina. *Appl. Phys. Lett.* 71 (1997) 2770-2772.
- [31] S. Cabrini, A. Carpentiero, R. Kumar, L. Businaro, P. Candeloro, M. Prasciolu, A. Gosparini, C. Andreani, M. De Vittorio, T. Stomeo, E. Di Fabrizio, Focused ion beam lithography for two dimensional array structures for photonic applications. *Microelectron. Eng.* 78–79 (2005) 11–15
- [32] P. M. Nellen, V. Callegari, R. Bronnimann. FIB-milling of photonic structures and sputtering simulation. *Microelectron. Eng.* 83 (2006) 1805–1808
- [33] D. Freeman, S. Madden, B. Luther-Davies, Fabrication of planar photonic crystals in a chalcogenide glass using a focused ion beam, Vol. 13, No. 8 *OPT. EXPRESS* 3079-3086
- [34] W.C. Stumpf, T. Asano, T. Kojima, M. Fujita, Y. Tanaka, and S. Noda, Spectral Reflectance Measurement of Two-Dimensional Photonic Nanocavities with Embedded Quantum Dots in Conference on Optical MEMs and Nanophotonics, 2008 IEEE/LEOS, paper M1.2.
- [35] J. Han, H. Lee, B-K Min, S. J. Lee, Prediction of nanopattern topography using two-dimensional focused ion beam milling with beam irradiation intervals, *Microelectron. Eng.* 87 (2010) 1–9