

NUMERICAL DESIGN OF PHOTONIC MICROSTRUCTURES

Victor Banda Amézquita(1), Oleksiy V. Shulika (2)

¹ [Licenciatura en Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica] | victorbandam@gmail.com

² [Departamento de Ingeniería Electrónica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca] | oshulika@ugto.mx

Resumen

Se plantean relaciones empíricas para el parámetro V y el parámetro W de fibras con revestimiento de cristal fotónico para predecir las propiedades de transmisión, basadas en parámetros geométricos fundamentales; el diámetro de los huecos y la separación entre huecos. De esta manera no es necesario el uso de costosos cálculos numéricos. El software Matlab es usado en este proyecto como parte de la implementación de diseño y simulación.

Abstract

Empirical relations for the V parameter and W parameter of Photonic Crystal Fibers arise to predict the transmission properties based on the fundamental geometrical parameters; the hole diameter and the hole spacing. This way no costly numeric computations are needed. Matlab software is used in this project as part of design implementation and simulation.

Palabras Clave

Cristal fotónico; Parámetro V ; Parámetro W ; Dispersión cromática; Índice efectivo

INTRODUCCIÓN

Marco Teórico

Las fibras ópticas con revestimiento de cristal fotónico (PCFs por sus siglas en inglés Photonic Crystal Fibers) han sido objeto de intensivo estudio debido a la flexibilidad de diseño que ofrecen para controlar propiedades modales. Estas fibras son usualmente formadas por un defecto central rodeado por múltiples huecos en una disposición triangular periódica. Las PCFs tienen algunas propiedades extraordinarias, como amplio rango de longitud de onda en transmisión mono modo, dispersión cromática inusual y alta o baja no linealidad.

Descripciones teóricas de Fibras con revestimiento de cristal fotónico han sido comúnmente basadas en métodos numéricos tales como el método de expansión de onda plana [1], métodos que emplean funciones localizadas [2], el método de elemento finito (FEM) [3,4], entre otros. Una aproximación numérica es generalmente necesaria debido a la compleja sección transversal de las PCFs. Sin embargo, las simulaciones numéricas son, generalmente, costosas en tiempo y recursos. Recientemente una aproximación analítica basada en la frecuencia normalizada (*parámetro V*), usualmente aplicada al diseño de fibras ópticas convencionales, fue desarrollada para PCFs de guiado por índices [5]. A través de la correcta definición del parámetro *V*, varias propiedades de las PCFs pueden ser entendidas cualitativamente dentro del marco de referencia de las teorías para fibras clásicas sin los numerosos cálculos computacionales. La facilidad de diseño para PCFs requiere relaciones empíricas del parámetro *V* y el parámetro *W* (Constante de atenuación transversal normalizada)

que depende únicamente de la longitud de onda y de los parámetros estructurales de la fibra. [6,7]

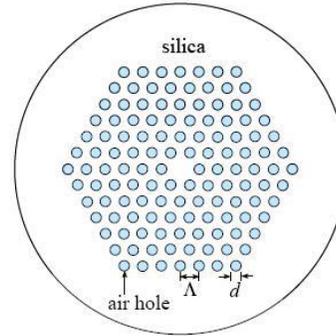


IMAGEN 1: Fibra con revestimiento de cristal fotónico

Considerando una PCF con un patrón reticular triangular o hexagonal de huecos como se muestra en la IMAGEN 1, donde *d* es el diámetro del hueco, *Λ* es el espaciado entre huecos y el índice de refracción del Silicio es 1.45. Omitiendo el hueco en el centro, se crea un defecto central con un alto índice el cual se asemeja al núcleo de la fibra.

MATERIALES Y MÉTODOS

Relación empírica usando los parámetros *V* y *W*

Relación empírica usando el parámetro *V*

Las fibras de cristal fotónico con patrón triangular pueden ser bien parametrizadas por la frecuencia normalizada dada por:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \alpha_{eff} \sqrt{n_{co}^2 - n_{fsm}^2} = \sqrt{U^2 - W^2} \quad (1)$$

Con

$$U = \frac{2\pi}{\lambda} \alpha_{eff} \sqrt{n_{co}^2 - n_{eff}^2} \quad (2)$$

$$W = \frac{2\pi}{\lambda} \alpha_{eff} \sqrt{n_{eff}^2 - n_{fsm}^2} \quad (3)$$

Donde λ es la longitud de onda de operación, n_{co} = índice del núcleo, n_{FSM} = índice del revestimiento, n_{eff} = índice efectivo del modo guiado fundamental, α_{eff} = radio efectivo del núcleo, asumido como $\frac{\Lambda}{\sqrt{3}}$. El parámetro *U* es la fase transversal normalizada y el parámetro *W* es la constante de atenuación transversal.

Se ha propuesto el parámetro *V* efectivo, para una PCF de patrón triangular [9], como:

$$V_{eff} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{n_{eff}^2 - n_{fsm}^2} \quad (4)$$

Esta definición es intrínsecamente diferente a la definición original del parámetro V teórico para fibras de salto de índice (SIF, por sus siglas en inglés Step-Index Fiber) y corresponde al parámetro W. Aunque podemos estimar las propiedades fundamentales de las PCFs usando el parámetro V de la Ec. 1, una restricción es que se requiere un método numérico para lograr precisión en el cálculo del índice efectivo del revestimiento, n_{FSM} .

Los valores de V pueden ser calculados a través del método vectorial de elemento finito como función de $\frac{\lambda}{\Lambda}$ para $\frac{d}{\Lambda}$. Representado por la fórmula:

$$V\left(\frac{\lambda}{\Lambda}, \frac{d}{\Lambda}\right) = A_1 + \frac{A_2}{1 + A_3 \exp\left(\frac{A_4 \lambda}{\Lambda}\right)} \quad (5)$$

Para lograr un ajuste preciso, los datos son truncados en $V=0.85$. En la Ec. 5, los parámetros de ajuste A_i de 1 a 4 dependen solo de $\frac{d}{\Lambda}$. Los datos son bien descritos por la siguiente expresión:

$$A_i = a_{i0} + a_{i1} \left(\frac{d}{\Lambda}\right)^{b_{oi1}} + a_{i2} \left(\frac{d}{\Lambda}\right)^{b_{i2}} + a_{i3} \left(\frac{d}{\Lambda}\right)^{b_{i3}} \quad (6)$$

Y los coeficientes a_{i0} a a_{i3} y b_{i1} a b_{i3} están dados en la Tabla 1. Para valores $\frac{\lambda}{\Lambda} < 2$ y $V > 0.85$ la Ec. 5 da los valores de V (IMAGEN 2), los cuales se desvían menos de 1.3% de los valores obtenidos en Ec. 1.

Usando el parámetro efectivo V en la Ec. 5, el índice efectivo del revestimiento puede ser calculado sin necesitar cálculos numéricos (IMAGEN 3).

De la Ec. 5, la condición de corte, dada como $V=2.405$, como en SIFs convencionales. Usando la relación empírica de la Ec. 5 y fórmulas en términos del parámetro V para las SIFs, las propiedades fundamentales de las PCFs, tales como campo modal, diámetro, divergencia del haz, pérdida por empalme entre otras, pueden ser estimadas.

Tabla 1: Coeficientes de ajuste en Ec. 6.

| | i=0 | i=1 | i=2 | i=3 |
|----------|-----------|------------|----------|----------|
| a_{i0} | 0.54808 | 0.71041 | 0.16904 | -1.52736 |
| a_{i1} | 5.00401 | 9.73491 | 1.85765 | 1.06745 |
| a_{i2} | -10.43248 | 47.41496 | 18.96849 | 1.93229 |
| a_{i3} | 8.22992 | -437.50962 | -42.4318 | 3.89 |
| b_{i1} | 5 | 1.8 | 1.7 | -0.84 |
| b_{i2} | 7 | 7.32 | 10 | 1.02 |
| b_{i3} | 9 | 22.8 | 14 | 13.4 |

Relación empírica usando el parámetro V

Usando la Ec. 5, el índice efectivo del revestimiento, n_{FSM} se consigue fácilmente, pero a un alto costo en cálculos numéricos para lograr valores precisos de n_{eff} en la Ec. 5. Es más conveniente usar la relación empírica del parámetro W para PCFs. Sin embargo, usar solo el parámetro W es insuficiente para obtener el valor de n_{eff} . Para conseguir el valor de n_{eff} es necesario utilizar ambos, el parámetro V y el parámetro W.

Los valores de V pueden ser calculados a través del método vectorial de elemento finito como función de $\frac{\lambda}{\Lambda}$ para $\frac{d}{\Lambda}$. Representado por la fórmula:

$$W\left(\frac{\lambda}{\Lambda}, \frac{d}{\Lambda}\right) = B_1 + \frac{B_2}{1 + B_3 \exp\left(\frac{B_4 \lambda}{\Lambda}\right)} \quad (7)$$

Para lograr un ajuste preciso, los datos son truncados en $W=0.1$. En la Ec. 7, los parámetros de ajuste A_i de 1 a 4 dependen solo de $\frac{d}{\Lambda}$. Los datos son bien descritos por la siguiente expresión:

$$B_i = c_{i0} + c_{i1} \left(\frac{d}{\Lambda}\right)^{d_{i1}} + c_{i2} \left(\frac{d}{\Lambda}\right)^{d_{i2}} + c_{i3} \left(\frac{d}{\Lambda}\right)^{d_{i3}} \quad (8)$$

Y los coeficientes c_{i0} a c_{i3} y d_{i1} a d_{i3} están dados en la Tabla 2. Para valores $\frac{\lambda}{\Lambda} < 2$ y $W > 0.1$ la Ec. 7 da los valores de W (IMAGEN 4), los cuales se desvían menos de 0.015 de los valores obtenidos en Ec. 3.

Ahora, usando el parámetro V en la Ec. 5 y el parámetro W de la Ec. 7, el índice efectivo del modo fundamental, n_{eff} , puede ser obtenido sin cálculos numéricos (IMAGEN 5).

Tabla 2: Coeficientes de ajuste en Ec. 8.

| | i=0 | i=1 | i=2 | i=3 |
|----------|-----------|------------|-----------|----------|
| c_{i0} | -0.0973 | 0.53193 | 0.24876 | 5.29801 |
| c_{i1} | -16.70566 | 6.70858 | 2.72423 | 0.05142 |
| c_{i2} | 67.13845 | 50.04855 | 13.28649 | -5.18302 |
| c_{i3} | -50.25518 | -540.66947 | -36.80372 | 2.7641 |
| d_{i1} | 7 | 1.49 | 3.85 | -2 |
| d_{i2} | 9 | 6.58 | 10 | 0.41 |
| d_{i3} | 10 | 24.8 | 15 | 6 |

Dispersión Cromática

Las PCFs poseen la propiedad de poder controlar fácilmente su dispersión cromática variando el diámetro de los huecos y la separación entre estos. La controlable dispersión cromática en las PCFs es un importante problema en aplicaciones prácticas

en sistemas de comunicaciones ópticas, compensación de dispersión y óptica no lineal.

La dispersión cromática D de una PCF es calculada fácilmente a partir del índice efectivo del modo fundamental n_{eff} como función de la longitud de onda λ usada.

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{eff}(\lambda)}{d\lambda^2} \quad (9)$$

Donde c es la velocidad de la luz en el vacío. Cuando la relación $\frac{d}{\lambda}$ es muy pequeña y la separación entre huecos es grande, la curva de dispersión es cercana a la dispersión del silicio puro. A medida que el diámetro de los huecos aumenta, la influencia de la dispersión de guías de onda se vuelve más fuerte.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Transformado las fórmulas de las ecuaciones anteriores a código de Matlab se obtuvieron las siguientes curvas:

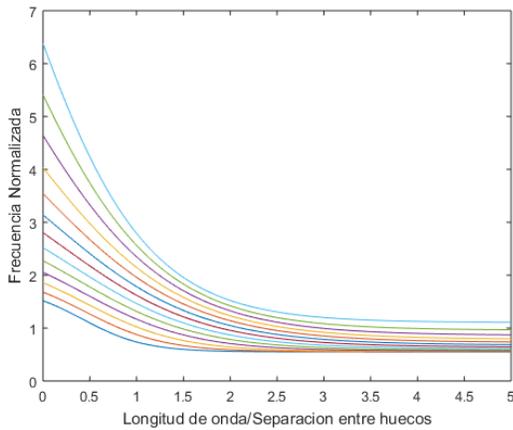


IMAGEN 2: Parámetro efectivo V como función de $\frac{\lambda}{\lambda}$ para $\frac{d}{\lambda}$ de 0.2 a 0.8 en pasos de 0.05

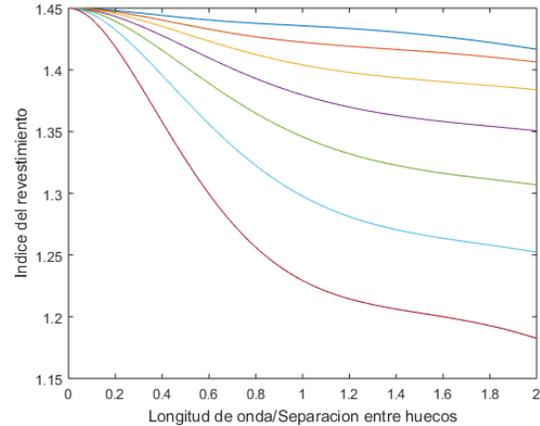


IMAGEN 3: Índice efectivo del revestimiento, n_{FSM} , como función de $\frac{\lambda}{\lambda}$ para $\frac{d}{\lambda}$ de 0.2 a 0.8 en pasos de 0.1

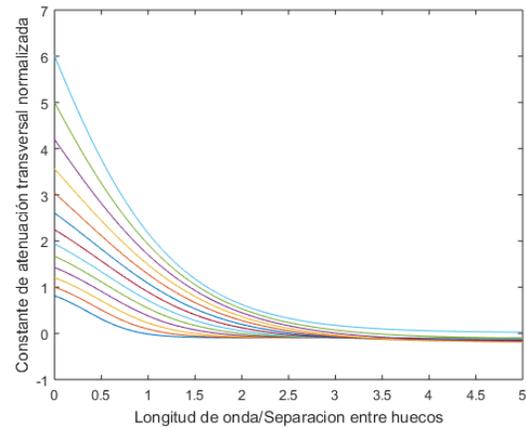


IMAGEN 4: Parámetro efectivo W como función de $\frac{\lambda}{\lambda}$ para $\frac{d}{\lambda}$ de 0.2 a 0.8 en pasos de 0.05

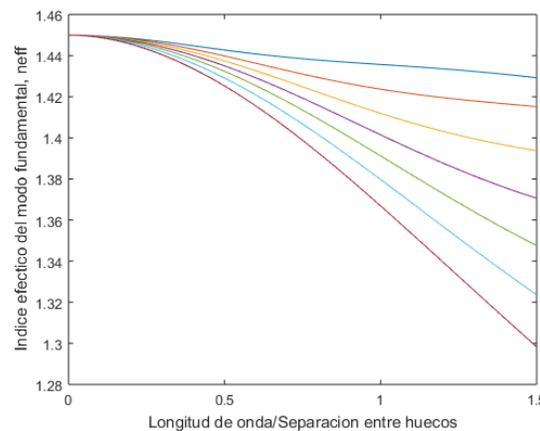


IMAGEN 5: Índice efectivo del modo fundamental, n_{eff} , como función de $\frac{\lambda}{\lambda}$ para $\frac{d}{\lambda}$ de 0.2 a 0.8 en pasos de 0.1

CONCLUSIONES

El objetivo de este proyecto, un modelo simplificado de las fibras con revestimiento de cristal fotónico, puede ser usado en el diseño básico de estas fibras o para su entendimiento por personas que ingresan a esta vertiente de las fibras ópticas sin la necesidad de adentrarse en tediosos y computacionalmente costosos métodos numéricos.

En perspectiva general, este proyecto me brindó muchas horas de trabajo y mucho conocimiento sobre las fibras de cristal fotónico que sembró en mí el deseo de aprender aún más sobre este tipo de fibras y sus numerosas ventajas sobre fibras convencionales.

AGRADECIMIENTOS

Aprovecho la oportunidad para agradecer a mi asesor de proyecto, Dr. Oleksiy Shulika, por su ayuda y disposición para disipar mis dudas en este proyecto, así como su tiempo para brindarme su guía en un mundo sin fin de información.

Agradezco también a mis padres por su incondicional apoyo en este y todos los proyectos que se me presentan.

REFERENCIAS

- [1] S.G. Johnson and J.D. Joannopoulos, (2001), "Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis," *Opt. Express* **8**, 173-190.
- [2] D. Mogilevtsev, T. A. Birks, and P. St. J. Russel, (1998) *Opt. Lett.* **23**, 1662.
- [3] M. Koshiba, (2002), "Full-vector analysis of photonic crystal fibers using the finite element method," *IEICE Trans. Electron.* **E85-C**, 881-888.
- [4] K. Saitoh and M. Koshiba, (2002), "Full-vectorial imaginary-distance beam propagation method based on finite element scheme: Application to photonic crystal fibers," *IEEE J. Quantum Electron.* **38**, 927-933.
- [5] M. Koshiba and K. Saitoh, (2004), "Applicability of classical optical fiber theories to holey fibers," *Opt. Lett.* **29**, 1739-174.
- [6] Kunimasa Saitoh, T. F. (2006). Approximate empirical relations for nonlinear. *Approximate empirical relations for nonlinear*, 1-11.
- [7] Kunimasa Saitoh, Y. T. (2005). Endlessly single-mode holey fibers: *Endlessly single-mode holey fibers*: , 1-7.
- [8] *Encyclopedia of Laser Physics and Technology - V number, normalized frequency, step-index fiber*, . (n.d.). Retrieved feb 14,

(2011), from *Encyclopedia of Laser Physics and Technology - V number, normalized frequency, step-index fiber*: http://www.rp-photonics.com/v_number.html

[9] Martin Dybendal Nielsen, Niels Asger Mortensen and Jacob Riis Folkenberg, Anders Bjarklev, (2003). Mode-Field Radius of Photonic Crystal Fibers Expressed by the V-parameter. *Optics Letters*, Vol. 28, Issue 23, pp. 2309-2311.