

FIBRA MICRO-ESTRUCTURADA PARA LA COMPENSACIÓN DE LA DISPERSIÓN CROMÁTICA EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS

MICRO-STRUCTURED FIBER FOR CHROMATIC DISPERSION COMPENSATION IN OPTIC COMMUNICATION SYSTEMS

VICTOR H. ARISTIZABAL

Escuela de Física, Universidad Nacional de Colombia – Medellín, vharisti@unal.edu.co

Recibido para revisar agosto 29 de 2008, aceptado julio 17 de 2009, versión final agosto 10 de 2009

RESUMEN: En este trabajo se analiza una fibra óptica micro-estructurada que presenta un pico de dispersión anómala aproximadamente de -5800 ps/(nm-km) alrededor 1.547 μm , haciéndola ideal para propósitos de compensación en la tercera ventana de los sistemas ópticos de comunicaciones. Esta fibra especial consiste en un medio homogéneo de Sílice de alta pureza con huecos de aire de diámetros diferentes, dispuestos en siete anillos hexagonales que se mantienen a lo largo de la estructura. Para el análisis se utilizó el método de los elementos finitos debido a que exhibe una estructura compleja donde el tratamiento analítico no es posible.

PALABRAS CLAVE: Modelación numérica de fibras ópticas, Diseño y fabricación de fibras, Fibras ópticas, Fibras de cristal fotónico, Fibras micro-estructuradas, Dispersión en fibras ópticas.

ABSTRACT: In this work, a micro-structured fiber features a peak of anomalous dispersion about -5800 ps/(nm-km) around 1.547 μm is analyzed. It is ideal for compensation purposes in the third window of the optical communications. This special fiber consisting of a homogeneous Silica region with different diameter air-holes, they are arranged at seven hexagonal rings that run along the length of the structure. For the analysis the finite elements method was utilized due to it exhibit a complex structure where analytic treatment is impossible.

KEYWORDS: Optical fibers numeric modeling, Fiber design and fabrication, Fiber optics, Photonic crystal fibers, Micro-structured fibers, Dispersion in fiber optics.

1. INTRODUCCIÓN

La dispersión en un sistema de comunicaciones surge cuando el tiempo de duración de un pulso de luz se extiende durante la transmisión en una fibra óptica. Un pulso corto de luz, al experimentar lo anterior, se hace más largo traslapándose con los pulso adyacentes, dando como resultado un flujo de bits poco confiable, tal como se muestra en la Figura 1 donde los círculos en las figuras representa embobinados de fibra óptica. Las figuras (a) y (b) muestran la dependencia de la distorsión de la señal con la

distancia, es decir, la señal experimenta mayor dispersión a distancias más largas, al punto tal que no se puede resolver los bits enviados dando como resultado final una limitación en la velocidad de transmisión en el sistema óptico de comunicaciones.

Hay varias clases de dispersión, las más significativas son la dispersión cromática, dispersión modal y dispersión de guía de onda (hay una amplia descripción de cada una de ellas en [1]). Cada una es generada por mecanismos

diferentes pero al final producen el mismo efecto sobre el pulso que se propaga.

Los más recientes avances en tecnología de fibra óptica se han interesado en el desarrollo de dispositivos ópticos alrededor de $1.55 \mu\text{m}$ (tercera ventana de telecomunicaciones) para la transmisión de información sobre enlaces ópticos instalados años atrás a $0.850 \mu\text{m}$ y $1.3 \mu\text{m}$ (primera y segunda ventana de telecomunicaciones, respectivamente). No obstante, estos sistemas presentan dispersión cromática positiva (o normal), lo cual limita la velocidad de transmisión de datos. Esta dispersión normal puede ser compensada mediante la introducción de dispositivos relativamente pequeños con altos valores de dispersión de signo opuesto, es decir, dispersión negativa (o anómala), y de esta manera se recuperaría la forma del pulso que se introduce al inicio del sistema de transmisión (ver Figura 2).

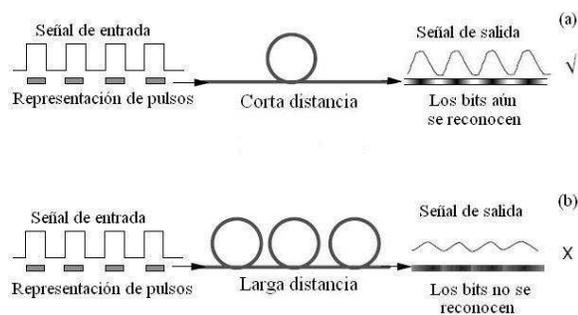


Figura 1. Efecto de la dispersión con la distancia en la señal que viaja en la fibra

Figure 1. Dispersion effect as distance function of the signal that travels into the fiber

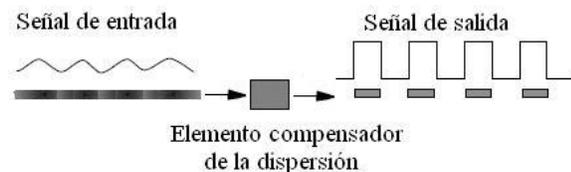


Figura 2. Función del elemento compensador de la dispersión

Figure 2. Dispersion compensator element function

Muchos dispositivos para la compensación de la dispersión han sido presentados en los últimos años, pero el diseño más eficaz para este fin, basado en fibras convencionales, es la fibra con

perfil de índice en forma de W [2]. El diseño básico de una fibra W consiste en dos regiones de núcleo concéntricas separadas espacialmente y asimétricamente mediante un juego de regiones de revestimiento [2-10]. Para este tipo de fibra convencional tipo W, el mejor resultado experimental alcanzado para la dispersión es de aproximadamente $-1800 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ [6].

Desde la introducción de las fibras microestructuradas, también llamadas fibras de cristal fotónico [11, 12], se han realizado diferentes estructuras que guían señales ópticas utilizando arreglos de huecos micro-estructurados [13]. En estos sistemas, el índice de refracción efectivo de los modos propagantes es un parámetro esencial, pues determina entre otras, las propiedades de dispersión de la guía de ondas.

La gran variedad de posibles formas y arreglos para los huecos demandan el uso de métodos numéricos que permitan modelar adecuadamente la sección transversal de estas estructuras para analizarlas. Adicionalmente, la existencia de interfases con alto contraste en el índice de refracción entre el material con que se fabrican (generalmente Sílice puro) y los huecos de aire, hace necesario considerar una solución vectorial para tomar en cuenta los efectos de polarización del campo óptico. Entre las técnicas propuestas, el método de elementos finitos (FEM: Finite Element Method), se ha utilizado exitosamente, debido a que puede modelar cualquier geometría y heterogeneidad que tenga la guía de ondas. Además, se han desarrollado diferentes formulaciones vectoriales; dentro de estas aproximaciones, existen las que se formulan en término de todas las componentes del campo eléctrico (o magnético) en donde se debe introducir una función de penalidad con coeficientes artificiales para eliminar las soluciones espurias que aparecen mezcladas con las soluciones físicamente aceptables [14], es decir, en estos esquemas la exactitud de la solución depende de dicha penalidad. Este problema fue resuelto con elementos de borde de orden superior [15, 16], haciendo posible la solución de la ecuación de onda vectorial a costa del aumento de la complejidad del algoritmo y, por ende, demandando altos requerimientos

computacionales y mayor tiempo de procesamiento.

Como una alternativa más eficiente a las soluciones vectoriales, el autor propuso mejorar la aproximación escalar para ampliar su rango de validez a longitudes de onda largas y fracciones de llenado de aire grandes en fibras de cristal fotónico [17, 18], incluyendo en el análisis por el método de elementos finitos escalar (SFEM), un término de corrección que da cuenta de los efectos de polarización generados por las interfases material-hueco. Para este propósito se usaron elementos triangulares de primer orden, cuya región que delimitan es de índice de refracción homogéneo, y se aprovecha el hecho de que el SFEM provee directamente la distribución del campo sobre la sección transversal de la fibra para la corrección al análisis escalar. Con esta metodología se analizaron exitosamente fibras mono-modo con huecos de geometría circular, distribuidos regularmente sobre la sección transversal.

En este trabajo se quiere aplicar el método para analizar una fibra micro-estructurada con huecos circulares donde su perfil de índice es en forma de W. Por considerarlo de interés, primero se presenta una descripción del método y luego se muestran los resultados obtenidos para el índice efectivo y el parámetro de dispersión de esta estructura reportada en [19].

2. GEOMETRÍA DE LA FIBRA MICRO-ESTRUCTURADA

La fibra micro-estructurada consta de un medio homogéneo de Sílice de alta pureza con un arreglo hexagonal de huecos de aire, de diámetros d diferentes y distancia Λ entre huecos consecutivos, dispuestos en siete anillos hexagonales que se mantienen a lo largo de la estructura, ver Figuras 3.

La Figura 4 muestra la estructura junto a su perfil de índice de refracción, donde se puede identificar claramente dos regiones de mayor valor del índice de refracción que actuarían como núcleos, y las demás que son menor harían de revestimiento. Nótese que el primer anillo de

huecos se ha desaparecido para así obtener una región central de 4Λ de diámetro que actúa como núcleo.

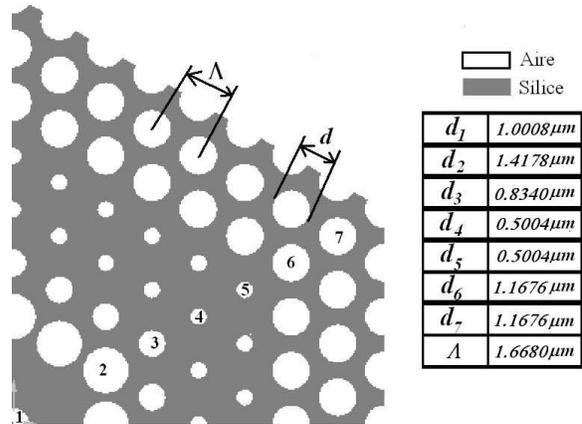


Figura 3. Un cuarto de la fibra con los diámetros de los huecos de aire, donde los números representan los diferentes diámetros

Figure 3. One quarter of the fiber with the air-holes diameters, where the numbers represent the different diameters

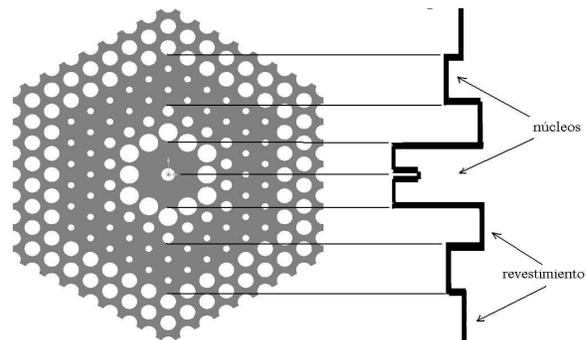


Figura 4. La estructura completa con su perfil de índice de refracción

Figure 4. Complete structure joins at its refraction index profile

3. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE ANÁLISIS [18]

3.1 Método de Elementos Finitos Escalar

El campo eléctrico de un modo de propagación en una guía de onda arbitraria se puede expresar como

$$\vec{E}(x, y, z) = \{\vec{E}_t + E_z \hat{z}\} \exp(i\beta z), \quad (1)$$

donde β es la constante de propagación, \hat{z} es el vector unitario paralelo al eje de la guía, $\vec{E}_t = E_x \hat{x} + E_y \hat{y}$ y E_z son las componentes transversal y longitudinal del campo eléctrico, respectivamente. Si trabajamos el campo como se describe en (1) en la ecuación de onda vectorial, fácilmente se puede demostrar que la componente transversal del campo eléctrico satisface la ecuación de onda:

$$\{\nabla_t^2 + k_0^2 n^2(x, y) - \beta^2\} \vec{E}_t = -\nabla_t \cdot \{\vec{E}_t \cdot \nabla_t \ln n^2\}, \quad (2)$$

donde ∇_t^2 es el operador Laplaciano en el plano transversal, $n = n(x, y)$ es el perfil del índice de refracción, y $k_0 = 2\pi/\lambda$ el número de onda en el vacío, siendo λ la longitud de onda.

La aproximación escalar consiste en despreciar los efectos de acoplamiento de las componentes del campo, haciéndose cero el término a la derecha de la ecuación (2), quedando:

$$\{\nabla_t^2 + k_0^2 n^2 - \tilde{\beta}^2\} \tilde{E}_t = 0, \quad (3)$$

donde \tilde{E}_t y $\tilde{\beta}$ son el campo escalar y su correspondiente constante de propagación, respectivamente.

Para solucionar la ecuación (3) se usa el método de elementos finitos, que convierte la ecuación (3) en el problema matricial de valores propios generalizado:

$$[A]\{e\} = \tilde{\beta}^2 [B]\{e\}, \quad (4)$$

donde el autovector $\{e\}$ contiene los valores del campo eléctrico en cada uno de los vértices de los elementos triangulares utilizado en la discretización de la sección transversal de la guía de onda. Las matrices $[A]$ y $[B]$ son de la forma:

$$[A] = \sum_e \iint \left(k_0^2 n_e^2 \{N\}^T \{N\} - \frac{\partial \{N\}^T}{\partial x} \frac{\partial \{N\}}{\partial x} - \frac{\partial \{N\}^T}{\partial y} \frac{\partial \{N\}}{\partial y} \right) dx dy, \quad (5)$$

$$[B] = \sum_e \iint \{N\}^T \{N\} dx dy. \quad (6)$$

La sumas en (5) y (6) corren sobre todos los elementos denotados por e . El índice de refracción $n(x, y)$ para cada elemento se considera uniforme e igual a n_e , $[N]$ es el vector de funciones de forma.

3.2 Corrección por Polarización

La corrección por polarización a la constante de propagación proviene, como se concluye de la ecuación (2), de la discontinuidad del índice de refracción. Para esta corrección se define la relación entre la constante de propagación β de la ecuación de onda vectorial (2) y $\tilde{\beta}$ de la ecuación de onda escalar (3). Para modos polarizados en x o y , la corrección de primer orden está dada por [20]

$$\beta_i - \tilde{\beta}_i = - \frac{\int \frac{1}{n_x^2} \frac{\partial n_i^2}{\partial x_i} \frac{\partial \tilde{E}_i^*}{\partial x_i} \tilde{E}_i dx dy}{\int |\tilde{E}_i|^2 dx dy}, \quad (7)$$

donde i y x_i son igual a x o y para modos polarizados en x o y , respectivamente.

El parámetro de dispersión D de una guía de onda se puede calcular a partir de $n_{eff} = \beta_i / k_0$ en función de la longitud de onda a través de la siguiente expresión:

$$D = - \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{eff}}{d\lambda^2}, \quad (8)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío.

Para incluir el efecto de la dispersión cromática del material en la ecuación (8), se utilizó la ecuación de Sellmeier con los coeficientes reportados en la literatura para el Silice puro [1].

4. RESULTADOS

Para el análisis numérico solo se tomó un cuarto de la estructura debido a la doble simetría que presenta la fibra, tal como se muestra en la Figura 5(a), usando elementos triangulares de

primer orden. El discretizado fue refinado en la región que contiene los dos núcleos, porque allí es donde se confina fuertemente el campo eléctrico (Figura 5b).

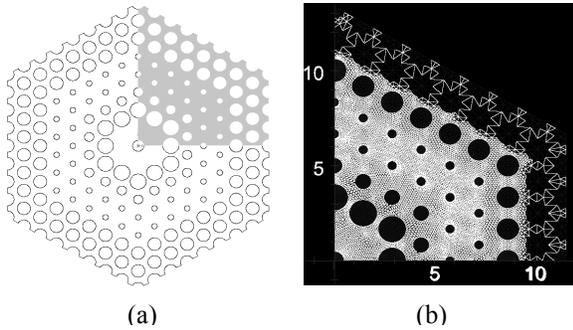


Figura 5. Discretización de un cuarto de la sección transversal de la fibra
Figure 5. One quarter discretization of the fiber cross section

En las Figuras 6 y 7 se comparan los resultados obtenidos del índice efectivo y el parámetro de dispersión del modo fundamental tipo HE₁₁ con el análisis escalar reportado en [19], sobre un rango de longitud de onda desde 1.530 μm a 1.575 μm. La curva sólida representa el análisis escalar de la Ref. 19, la curva segmentada es nuestro análisis escalar y la curva punteada es nuestro análisis teniendo en cuenta la corrección por efectos de polarización.

Nótese que en esta estructura, la luz se propaga en la parte central y en la región que tiene los huecos de aire más pequeños (ver Figura 8), por lo que el acople entre las componentes ortogonales del campo eléctrico es relativamente fuerte y, por consiguiente, el resultado de las soluciones escalares para el índice efectivo y la dispersión difieren de la solución que incluye la corrección por efectos de polarización como se muestra en las figuras 6 y 7.

El análisis muestra que para longitudes de onda inferiores a 1.547 μm la luz está mayoritariamente confinada en el núcleo central y la dispersión es muy pequeña (ver Figuras 7 y 8a), mientras que para longitudes de onda superiores la luz se encuentra mayoritariamente confinada en el núcleo externo y la dispersión también es pequeña (ver Figuras 7 y 8c). En

cambio, justo en la longitud de onda de 1.547 μm el índice efectivo cambia drásticamente su pendiente (ver Figura 6) y, por ende, se produce un gran pico de dispersión anómala de aproximadamente -5800 ps/(nm-km) y allí la luz esta confinada en ambos núcleos con igual intensidad (ver Figuras 7 y 8b). Debido a este pico de dispersión anómala es que esta fibra tiene un gran potencial como compensadora de dispersión normal.

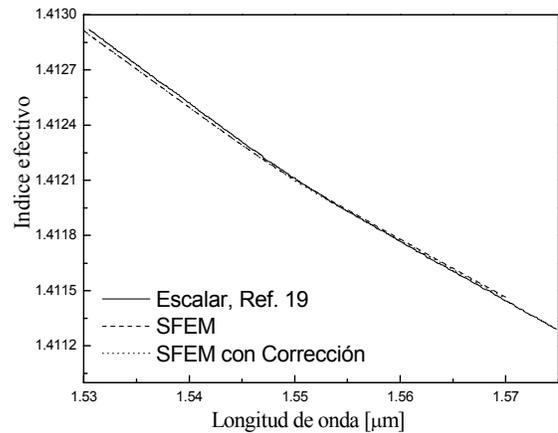


Figura 6. Curva del índice efectivo en función de la longitud de onda
Figure 6. Effective index curve as wavelength function

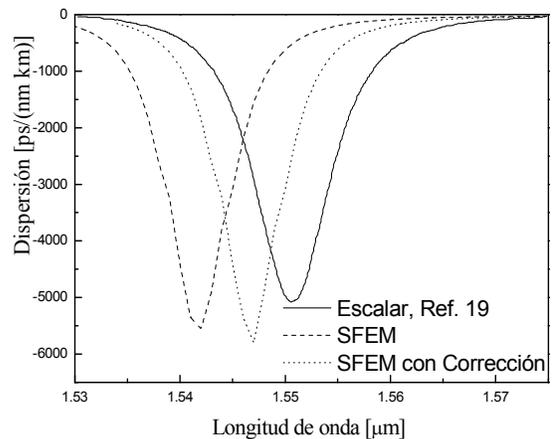


Figura 7. Curva del parámetro de dispersión en función de la longitud de onda
Figure 7. Dispersion parameter curve as wavelength function

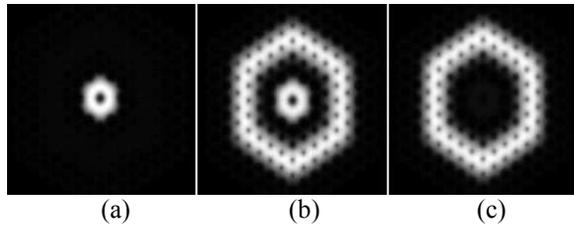


Figura 8. Perfil de intensidad del campo eléctrico para el modo tipo HE_{11} calculado con SFEM para las longitudes de onda: (a) $\lambda=1.530 \mu\text{m}$, (b) $\lambda=1.547 \mu\text{m}$, (c) $\lambda=1.570 \mu\text{m}$

Figure 8. Electric field intensity profile for HE_{11} -like mode is computed with SFEM to wavelengths: (a) $\lambda=1.530 \mu\text{m}$, (b) $\lambda=1.547 \mu\text{m}$, (c) $\lambda=1.570 \mu\text{m}$

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha aplicado una metodología, basada en el método de elementos finitos escalar que incluye una corrección a la constante de propagación que da cuenta de los efectos de polarización, para analizar guías de onda ópticas micro-estructuradas; de esta manera se acerca más al carácter vectorial del campo electromagnético y, por consiguiente, se obtienen resultados más confiables.

Esta aproximación se ha utilizado para explorar las propiedades de propagación en guías de ondas especiales; en particular, se ha explorado un posible diseño de una guía de onda ideal para aplicaciones de compensación de la dispersión en telecomunicaciones, donde los resultados obtenidos para el índice efectivo y el parámetro de dispersión de la fibra óptica micro-estructurada, que consiste de siete anillos hexagonales de huecos de aire generándose dos regiones de núcleo, muestran que esta disposición particular de los huecos producen un gran pico de dispersión anómala.

6. AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Pedro Ignacio Torres Trujillo por su acompañamiento en este trabajo y a la Universidad Nacional de Colombia por su apoyo a través del programa de Becas Nacionales para estudiantes sobresalientes de posgrado.

REFERENCIAS

- [1] AGRAWAL, G. P. Fiber-Optic communication Systems, 3rd ed., Section 2.3: Dispersión in single-mode fibers, Wiley-interscience, New York, 2002.
- [2] LI, M. J. Recent Progress in fiber dispersion compensators, Proceeding 27th Eur. Conf. On Opt. Comm., ECOC'01, Amsterdam, 486-489, 2001.
- [3] THYAGARAJAN, K., VARSHNEY, R. K., PALAI, P., GHATAK, A. K., GOYAL, I.C. A Novel Design of a Dispersion Compensating Fiber, IEEE Photonics Technology Letters, 8, 1510-1512, 1996.
- [4] AKASAKA, Y., SUGIZAKI, R., KOKURA, K. Dispersion Compensating Optical Fiber, United States patent, No. US 5, 673, 354, Sep. 30, 1997.
- [5] AUGUSTE, J. L., BLONDY, J. M., CLAPEAU, M., MARCOU, J., DUSSARDIER, B., MONNOM, G., JINDAL, R. Design of a High Negative Chromatic Dispersion in a Single Mode Optical Fibre: Effect of the Central Index Dip, Optics Communications, 178, 71-77, 2000.
- [6] AUGUSTE, J. L., JINDAL, R., BLONDY, J. M., CLAPEAU, M., MARCOU, J., DUSSARDIER, B., MONNOM, G., OSTROWSKY, D. B., PAL, B. P., THYAGARAJAN, K. -1800 ps/(nm.km) Chromatic Dispersion at 1.55 μm in Dual Concentric Core Fibre, Electronics Letters, 36, 1689-1691, 2000.
- [7] NIELSEN, L. G., KNUDSEN, S. N., EDVOLD, B., VENG, T., MAGNUSSEN, D., LARSEN C. C., DAMSGAAR, H. Dispersion Compensating Fibers, Optical Fiber Technology, 6, 164-180, 2000.
- [8] YANDONG, G., SHUISHENG, J. Research on Three-Cladding Dispersion Compensating Fiber with Negative Dispersion Slope, Chinese Journal of Electronics, 9, 48-50, 2000.

- [9] AUGUSTE, J. L., BLONDY, J. M., MAURY, J., MARCOU, J., DUSSARDIER, B., MONNOM, G., JINDAL, R., THYAGARAJAN, K., PAL, B.P. Conception, Realization, and Characterization of a Very High Negative Chromatic Dispersion Fiber, *Optical Fiber Technology*, 8, 89-105, 2002.
- [10] GOYAL, I. C., GHATAK, A. K., VARSHNEY, R. K. Dispersion Compensating Fibers, *ICTON 2002*, 20-23, section A5, 2002.
- [11] KNIGHT, J. C., BIRKS, T. A., RUSSELL, P. S. J., ATKIN, D. M. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding, *Optics Letters*, 21, 1547-1549, 1996.
- [12] ARISTIZABAL, V. H. Introducción a la tecnología de fibras ópticas y análisis numérico de la propagación de la luz en fibras ópticas micro-estructuradas, *Tecno-Lógicas*, 19, 141-165, 2007.
- [13] RUSSELL, P. Photonic Crystal Fibers, *Science*, 299, 358-362, 2003.
- [14] RAHMAN, B. M. A., DAVIES, J. B. Penalty function improvement of waveguide solution by finite elements, *IEEE Trans. Microwave Theory Technology*, MTT-32, 922-929, 1984.
- [15] KOSHIBA, M., MARUYAMA, S., HIRAYAMA, K. A vector finite element method with the high-order mixed-interpolating-type triangular elements for optical waveguides problems, *Journal Lightwave Technology*, 12, 1547-1549, 1996.
- [16] KOSHIBA, M., TSUJI, Y. Curvilinear hybrid edge/nodal elements with triangular shape for guided-wave problems, *Journal Lightwave Technology*, 18, 737-743, 2000.
- [17] ARISTIZABAL, V. H., VELEZ, F. J., TORRES, P. I. Modelling of photonic crystal fibers with the scalar finite element method, *Proceeding SPIE*, 5622, 849-854, 2004.
- [18] ARISTIZABAL, V. H., VELEZ, F. J., TORRES, P. I. Analysis of photonic crystal fibers: Scalar solution and polarization correction, *Optics Express*, 14, 11848-11854, 2006.
- [19] FRANCO, M. A. R., RUGGIERI, M. T., SERRAO, V. A., SIRCILLI, F., ABE, N. M. Photonic crystal fiber for chromatic dispersion compensation, *Proceeding SPIE*, 5622, 955-960, 2004.
- [20] HUANG, W., HAUS, H. Analysis of buried-channel waveguides and couplers: scalar solution and polarization correction, *Journal Lightwave Technology*, 8, 642-648, 1990.