

Revisión del efecto de las curvaturas en fibras ópticas

D.A. González-Fernández, J.L. Arce-Diego, A. Cobo, J.M. López-Higuera
Grupo de Ingeniería Fotónica, Dto. TEISA, Universidad de Cantabria.
Avda. Los Castros s/n. 39005 Santander, Spain
E-mail: dagonfer@teisa.unican.es, jlance@teisa.unican.es

Abstract: A review of bending optical fiber effects is presented. Using the equivalent refractive index method based in electromagnetic optics, the different contributions of bending to the optical propagation are evaluated.

1. Introducción

En una fibra, son varios los factores responsables de las pérdidas que sufre la potencia óptica al atravesar una curvatura. Comprender el origen de estas pérdidas permite analizar ciertos comportamientos ópticos en la curvatura. Desde los años 60, se han desarrollado muchos métodos para explicar los efectos de la curvatura pero ninguno parece tener validez total debido a las simplificaciones adoptadas para lograr reducir el problema a algo tratable. Se propone la hipótesis de guiado débil y normalmente se trabaja sobre una aproximación simple, que consiste en modelar la fibra curvada como una guía de onda de tipo tira rodeada por una cubierta infinita¹, para obtener soluciones analíticas.

En este artículo se presentan los efectos observados al curvar una fibra óptica y su evaluación mediante el método del índice de refracción equivalente^{2,3}.

2. Comportamientos Ópticos en una Curvatura

El curvar una fibra representa la transición a una nueva estructura de guiado óptico en la que los modos guiados dejan de estar confinados y sufren atenuaciones por radiar parte de su potencia al medio exterior. En una fibra recta se descompone la radiación óptica en modos guiados, modos leaky, modos cubierta y modos radiados. Al curvar existen modos leaky puesto que un modo guiado radiará potencia comportándose como lo hacen los leaky en un tramo recto de fibra, modos radiados y modos de galería que se propagan en la interfase cubierta-medio exterior.

Este acoplo de unos modos a otros no se produce de forma instantánea sino que ocurre una región de la curvatura llamada zona de transición, y en la cual parte de la potencia asociada al modo guiado se acoplará a modos radiados. Dicho acoplo entre segmentos rectos y curvados de la guía de onda provoca las llamadas pérdidas de transición, como se aprecia en la Figura 1. Una vez superada la zona de transición, el modo ya es un modo leaky y las pérdidas observadas son pérdidas puras que se producen por ser la velocidad de fase angular igual a la de propagación de la luz en el medio (la energía se disocia del frente de onda). Así, el frente de onda se puede considerar desplazado hacia el exterior de la curvatura una determinada distancia del eje de la

fibra, δ , lo que supone una variación en la distribución modal.

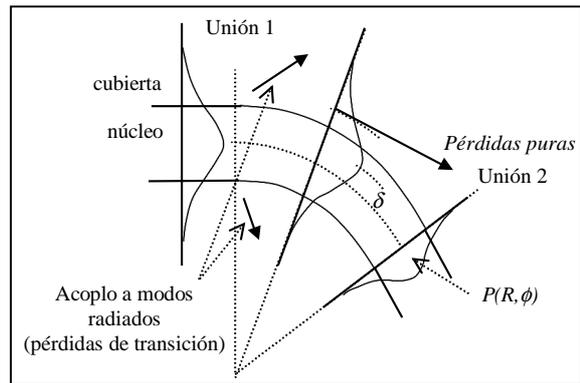


Figura 1. Representación gráfica de las pérdidas de transición y de las pérdidas puras en una curvatura.

3. Método del Índice de Refracción Equivalente

Para una caracterización completa de los efectos que tiene sobre la propagación óptica el curvar la estructura de guiado, se ha de buscar una teoría lo más completa posible que abarque todos los comportamientos ópticos y que no persiga únicamente la obtención de una fórmula que represente las pérdidas. La teoría que se ha seguido para dicha caracterización global es la del Índice de Refracción Efectivo^{2,3}.

Este método, divide la estructura a analizar en un número de capas homogéneas de igual o desigual espesor cuyo número depende de la rapidez con la que se producen los cambios en el índice de refracción. Los campos en las capas adyacentes son relacionados mediante la multiplicación de matrices 2x2 que son derivadas de las condiciones de contorno en la interfase entre las distintas capas. Se parte de la transformación de la ecuación de onda hasta convertirla en^{2,3}:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial Z_i^2} - Z_i u(Z_i) = 0, \quad (1)$$

donde el sufijo i se refiere a las diferentes regiones en las que se descompone el índice de refracción, como en Figura 2 para una fibra de salto de índice con índice de refracción en el núcleo de n_1 y en la cubierta de n_2 y que se verán transformados a índices equivalentes \tilde{n}_1 y \tilde{n}_2 .

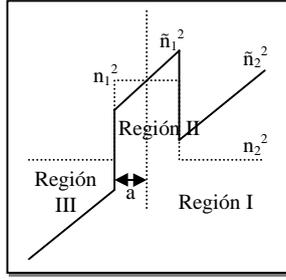


Figura 2. Perfil del índice de refracción al cuadrado de la guía (línea discontinua) y el equivalente de la guía curva (línea continua).

La solución de la ecuación de onda transformada, puede ser escrita en términos de las funciones de Airy y está dada por:

$$u(Z_i) = C_i Ai(Z_i) + D_i Bi(Z_i), \quad (2)$$

siendo el valor de $C_N=1$ y $D_N=0$ donde N representa la primera de las capas en las que se descompone el índice de refracción, si se mira desde el centro de la curvatura, ya que los valores asintóticos de las funciones de Airy para valores $Z_N \rightarrow \infty$, que se dan en esa región, deben de ser finitos.

4. Resultados

En la Figura 3 se representa el desplazamiento del campo para diferentes curvaturas y también se puede apreciar un ensanchamiento del spot.

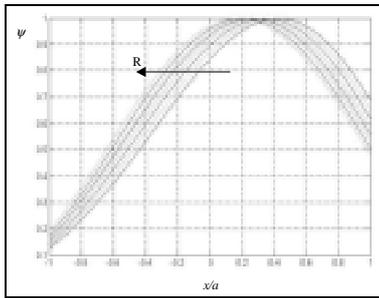


Figura 3. Desplazamiento del campo transversal en función de x/a para $V=4.6$ y distintos radios de curvatura.

Se pueden evaluar gráficamente las pérdidas y los índices efectivos de los modos *leaky* que se propagan en la estructura curva a partir de los picos Lorentzianos que posea la representación del cociente entre la suma de los coeficientes de Airy C_i y D_i para la región del núcleo y la región de la cubierta, ver la Figura 4. El valor donde se produce cada uno de los picos proporcionará la parte real y la anchura de cada pico la parte imaginaria del índice efectivo.

Existen dos valores críticos del radio de curvatura que indican los puntos en los que el índice efectivo del modo coincide con el valor del perfil del índice de refracción para un determinado radio. Para $R=R_0$ el punto de corte coincide con el radio del núcleo por lo que el campo transversal se volverá oscilatorio a partir de dicho radio y para $R<R_1$ aparece un nuevo punto de inflexión en el núcleo produciendo también la oscilación del campo⁴.

$$R_0 = \frac{a V^2}{\Delta v^2} \quad R_1 = \frac{a V^2}{\Delta u^2}, \quad (3)$$

con a , v , u , V y Δ el radio del núcleo, los autovalores normalizados de la cubierta y del núcleo, el parámetro de la fibra y el parámetro del perfil del índice respectivamente.

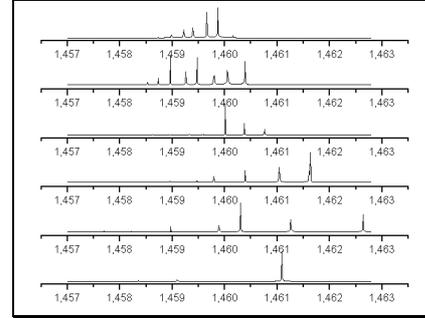


Figura 4. Valoración gráfica de las pérdidas de una curvatura en función del índice efectivo del modo *leaky*.

La teoría precedente se verá afectada por los efectos fotoelásticos por lo que es necesario modificarla ligeramente introduciendo otro término de perturbación en la permitividad equivalente. Sin embargo, se pueden conservar todas las fórmulas con la condición de reemplazar R por un radio efectivo de forma que ese radio efectivo (el que se medirá en la realidad de los experimentos), para el caso del silicio, se puede aproximar por:

$$R_{eff \text{ exp}} \approx 1.23 \cdot R. \quad (4)$$

5. Conclusiones

Se ha empleado el método del índice de refracción equivalente para la caracterización completa de las curvaturas en fibras ópticas lo que permite obtener funciones analíticas de los principales efectos presentes al curvar dicha estructura: *pérdidas* en la potencia transmitida, *acoplo* entre los distintos modos y *variación* de la distribución del campo transversal (desplazamiento hacia el exterior de la curvatura y ensanchamiento del campo).

6. Agradecimientos

Este trabajo se ha podido realizar en parte gracias a los medios aportados por el proyecto CICYT TIC98-0397-CO3-02.

7. Referencias

- [1]: A.H. Badar, *Transition and pure bending losses in multimode and single-mode bent optical fibres*, Journal of IEE Proceedings, Vol. 138, N° 4, pág. 261-268, 1991.
- [2]: I.C. Goyal, *Bent planar waveguides and whispering gallery modes: a new method of analysis*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 8, N° 5, pág. 768-774, 1990.
- [3]: A. Kumar, *Modal characteristics of bent dual mode planar optical waveguides*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 12, N° 4, pág. 621-624, 1994.
- [4]: C. Vassallo, *Théorie des guides d'ondes électromagnétiques*, Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, Edit. Eyrolles, Tomos I y II, 1985.