

Estudio teórico y experimental de los mecanismos de atenuación de guías de onda *rib* ARROW curvas

I. Salinas¹, A. López¹, I. Garcés¹, R. Alonso², A. Llobera³

¹Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones. Universidad de Zaragoza
Tf: 976761945. Fax: 976762111. E-mail: isalinas@unizar.es

²Departamento de Física Aplicada. Universidad de Zaragoza.

³Centro Nacional de Microelectrónica, Bellaterra (Barcelona)

Areas de interés: Óptica Integrada, Caracterización

Palabras clave: guía de ondas, ARROW, curvas

1.- Introducción

La fabricación de guías rectas en óptica integrada tiene interés en sí misma, especialmente en dispositivos activos donde pueden modificarse las propiedades de la luz guiada. Sin embargo, cambiar la dirección propagación de la luz con el uso de guías curvas aporta nuevas posibilidades en el diseño de circuitos de óptica integrada [1]. Por ejemplo, permite fabricar acopladores, divisores en Y, multiplexores y toda una serie de configuraciones que precisan esta capacidad de redireccionamiento de la luz con el objeto de hacer confluír o divergir diversos caminos ópticos. También es posible rediseñar circuitos lineales para conseguir mejores características dimensionales (como una mayor integración del circuito obtenido y la consiguiente reducción de tamaño) o de conectorización de los dispositivos. Desgraciadamente, la introducción de curvas en la configuración de las guías conduce a un inevitable incremento de la atenuación, tanto en la curva en sí misma como en las transiciones entre tramos con distinto radio de curvatura (incluida, por supuesto, la unión entre una guía recta y otra curva) [2-3].

Este trabajo consiste en el análisis de esa atenuación debida a curvaturas según tres procedimientos diferentes: un modelo teórico, simulaciones numéricas y medidas experimentales. El estudio se ha realizado con guías de onda de tipo *rib* (costilla) en las que el guiado en la dirección transversal a las capas se realiza mediante una estructura ARROW (*AntiResonant Reflecting Optical Waveguide*).

2.- Modelos teóricos.

2.a.-Pérdidas de radiación por curvatura

El primero de los fenómenos que provocan un incremento en la atenuación de una guía de óptica integrada curva, las pérdidas por radiación, está también presente en las fibras ópticas y ha sido estudiado ampliamente [4-5], debido precisamente a su influencia en la fabricación de cable de fibra óptica para comunicaciones.

Si se considera una guía de ondas óptica curvada con un radio constante R muy grande

con respecto a las dimensiones transversales de la guía, es posible realizar una serie de aproximaciones que facilitan una explicación fenomenológica del proceso que se produce. El perfil modal puede asimilarse al de una guía recta con sus mismas características, la constante de propagación β de los modos puede suponerse la misma, y los planos de igual fase pueden seguir considerándose perpendiculares a la dirección de propagación.

Con estas premisas, la velocidad de fase en el centro de la guía será la misma que en el caso de una guía recta. Sin embargo, en los puntos de la guía situados en la parte exterior de la curva deberá existir, para mantener el plano de igual fase perpendicular a la dirección de propagación, una velocidad de fase mayor, mientras que esa velocidad será inferior en los puntos situados en la parte interna de dicha curva. El índice efectivo de propagación seguirá la distribución inversa, puesto que:

$$n_{eff} = \frac{c}{v_f} \quad (1)$$

La condición para que exista un modo guiado es $n_{nucleo} > n_{eff} > n_{rec}$, con n_{rec} el índice del revestimiento del núcleo. Existirá entonces un punto x_l a partir de el cual el índice efectivo será menor que el índice de refracción del revestimiento y, si ese punto pertenece al núcleo de la guía, habrá parte de la luz que viaja por él que no cumpla la condición de guiado (cuando $x > x_l$) y, por tanto, se pierda en forma de radiación (o, dicho de otra forma, se acople a modos de radiación).

Este comportamiento da origen a una dependencia con el radio de la atenuación por radiación que se describe en [6], según:

$$\alpha_c = \frac{C_1}{\sqrt{R}} \cdot e^{-C_2 \cdot R} \quad (2)$$

2.b.-Pérdidas debidas a transiciones

El otro factor que produce un aumento de la atenuación en una guía curva son las pérdidas en la transición entre dos tramos de la guía con diferente radio de curvatura.

Desde un punto de vista ondulatorio, la causa estas pérdidas es clara: cuando existe una discontinuidad de cualquier tipo en una guía de ondas, como es el caso de la presencia de un

tramo curvo, se produce en ese punto un desajuste entre el perfil del modo propagante hasta la discontinuidad y el perfil modal que corresponde al tramo posterior. La magnitud de las pérdidas debidas a esa transición puede calcularse simplemente realizando la integral de solapamiento de los campos de cada tramo de la guía [7]:

$$\eta = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_1(x, y) E_2^*(x, y) dx dy \right|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_1(x, y) E_1^*(x, y) dx dy \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_2(x, y) E_2^*(x, y) dx dy} \quad (3)$$

donde E_1 y E_2 son los campos eléctricos en cada sección, y x e y son las coordenadas perpendiculares a la dirección de propagación z .

Para estudiar este efecto en las guías *rib* ARROW fabricadas se recurrirá a algunas de las aproximaciones más habituales en la literatura, como son la existencia de un único modo guiado, adjudicar un perfil gaussiano a dicho modo y considerar que la curvatura de la guía afecta al desplazamiento, pero no a la forma del campo. Con estas consideraciones, la expresión para la atenuación a_t (en decibelios) seguirá la conocida dependencia con la inversa del cuadrado del radio de curvatura [8]:

$$a_t = K \cdot \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)^2 \quad (4)$$

3.- Simulaciones numéricas.

El desarrollo previo es el aplicado habitualmente en la literatura para el estudio de las pérdidas de transición en guías de onda. Sin embargo, las dimensiones de las guías utilizadas suelen ser pequeñas en comparación con las de las guías ARROW que se analizan en este trabajo. En guías de gran anchura de *rib* es posible que la mayor parte de la potencia viaje en modos distintos del fundamental, lo que complicaría el análisis de la integral de solapamiento.

Por ese motivo es conveniente enfocar el análisis de las transiciones entre guías curvas y rectas desde un punto de vista alternativo como es el de la teoría de rayos, que prescinde del carácter ondulatorio de la luz y, por consiguiente, de sus características modales, para tratarla como un conjunto de rayos que siguen las leyes clásicas de reflexión y refracción de la óptica geométrica. Esta aproximación es aplicable cuando el número de modos es muy alto, de manera que prácticamente puede suponerse la solución de la guía como un continuo de valores propios.

Básicamente, el método consiste en calcular qué fracción de los rayos que viajan por la guía de entrada dejarán de cumplir la condición de reflexión total tras producirse la transición al tramo con diferente curvatura. Esa

fracción corresponderá precisamente a las pérdidas producidas en dicha transición.

La principal limitación del trazado de rayos es que no permite obtener las pérdidas de radiación de una guía curva, ya que predice que los rayos que sí permanecen guiados sufren siempre reflexiones totales perfectas y, en consecuencia, ni siquiera existen dichas pérdidas. Por tanto, es necesario utilizar un método numérico alternativo que permita estimar este tipo de pérdidas.

Concretamente, para obtener dicha estimación se han realizado simulaciones mediante BPM (*Beam Propagation Method*) tridimensional y basado en diferencias finitas [9], principalmente debido a su versatilidad, ya que permite estudiar de forma sencilla estructuras que varían en el eje z , como son por ejemplo las guías curvas. Para simplificar la representación de la curvatura de las guías se optó por utilizar una transformación de índice de refracción, ya que una guía de radio de curvatura R es equivalente a una guía recta cuyo perfil de índice de refracción es [10]:

$$n_{eq}(x) = n_0(x) \cdot \left(1 + \frac{x}{R} \right) \quad (5)$$

4.- Montaje experimental

En la figura 1 se muestran las dimensiones e índices de refracción de las guías bajo estudio, fabricadas sobre sustrato de silicio en el Centro Nacional de Microelectrónica de Barcelona. La reflexión antirresonante que caracteriza a una estructura ARROW se consigue mediante las dos capas planas situadas bajo el núcleo de la guía, diseñadas de forma que se produzca una interferencia constructiva en reflexión para la longitud de onda deseada (en este caso, en torno a los 670 nm). El guiado en la dirección lateral y en la parte superior del núcleo se consigue mediante reflexión total convencional.

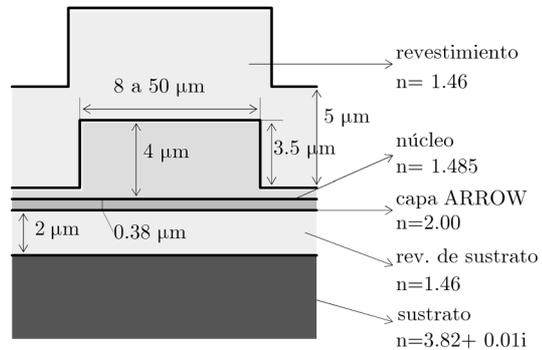


Figura 1: Esquema de las guías *rib* ARROW

Como se ha comentado anteriormente, las anchuras de *rib* de las guías que se analizan son superiores a las utilizadas usualmente en la literatura. Esto es debido a que el objetivo habitual es intentar conseguir guías monomodo, mientras que en este caso la motivación final del

estudio de guías curvas es el diseño de un sensor optoquímico que precisa, para obtener tolerancias adecuadas, guías de 20 y hasta 50 micras de anchura.

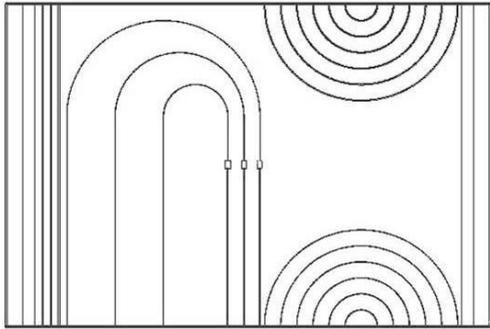


Figura 2: Diagrama de los chips con guías tipo "U" (en la parte derecha)

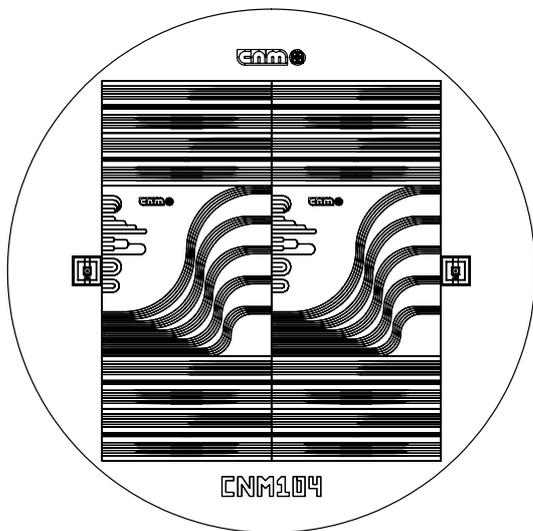


Figura 3: Diagrama de los chips con guías tipo "S" (en la parte central)

Puesto que las pérdidas en las guías con curvatura son debidas a dos mecanismos diferentes (pérdidas de radiación y de transición), se han fabricado y medido dos tipos diferentes de guías curvas: guías semicirculares, que mantienen una curvatura constante (guías tipo "U", figura 2) y guías con un cambio de signo en la curvatura (guías tipo "S", figura 3). La diferencia entre las pérdidas de unas y otras permitirá estimar la componente de las pérdidas debida a las transiciones de curvatura. Los radios de curvatura utilizados varían de 1 a 12 mm para las guías tipo "S" y de 1 a 5 mm para las de tipo "U". Se emplean anchuras de *rib* de 8 a 50 μm .

Estas guías se han medido en atenuación utilizando como entrada una fibra monomodo de 4 micras de diámetro y una fibra multimodo de 62.5 micras para recoger la luz a la salida y llevarla a un diodo PIN de silicio que actúa como detector. La fuente empleada ha sido un diodo superluminiscente (SLED) con una longitud de onda central de 678 nm. Para minimizar las pérdidas de inserción debidas a reflexiones en las interfaces fibra-aire-guía se ha depositado líquido adaptador de índice en esas zonas.

5.- Comparación de resultados

En las gráficas siguientes se resumen los resultados obtenidos tras la aplicación a las guías *rib* ARROW de los métodos teóricos descritos previamente, comparándolos con las medidas experimentales de las guías fabricadas.

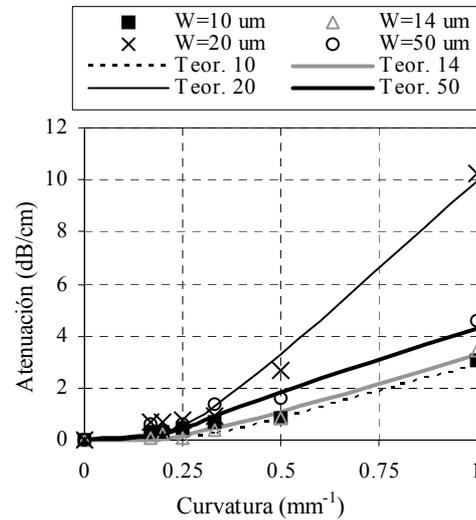
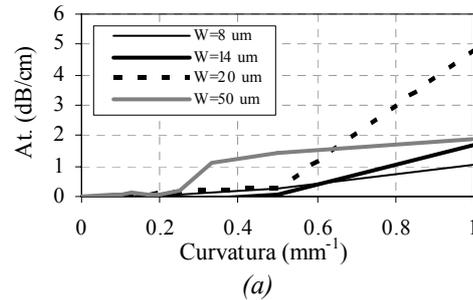
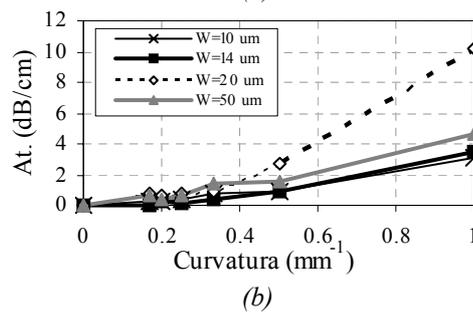


Figura 4. Atenuación experimental α_c debida a radiación por curvatura y su ajuste con la expresión teórica (2)



(a)



(b)

Figura 5. Atenuación de radiación en curva α_c estimada con BPM (a) y experimental (b)

La figura 4 muestra el ajuste de las medidas experimentales de la atenuación debida a radiación en la curva α_c a la dependencia (2), ajuste de relativo valor debido a la existencia de dos parámetros libres en la fórmula. Los resultados del BPM son similares en cuanto a tendencia a los experimentales (figura 5), si bien la atenuación prevista es sensiblemente inferior a

la medida. Sin embargo, en este caso no hay parámetros que sea necesario ajustar.

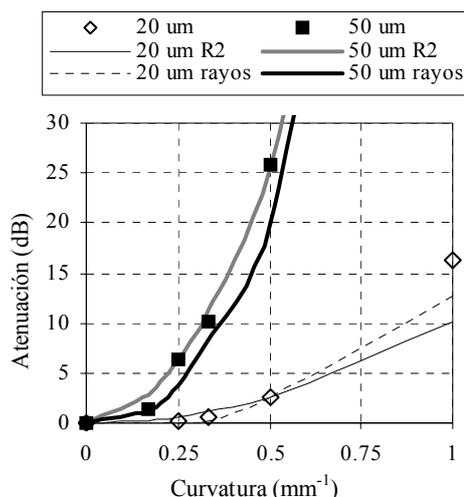


Figura 6. Comparativa de las pérdidas de transición de una guía "S" teóricas, según trazado de rayos y experimentales

La figura 6 muestra los datos obtenidos para la atenuación debida a transiciones en una guía tipo "S" (recta-curva, curva-curva y curva-recta) mediante la aplicación de la fórmula (4), (etiquetados como R2), junto a los calculados con el método de trazado de rayos (rayos) y las medidas experimentales, representadas como puntos en la gráfica. Nuevamente, a pesar de que el ajuste teórico es algo mejor, los resultados numéricos permiten obtener una estimación razonablemente precisa de los valores experimentales sin necesidad de introducir ningún parámetro libre de ajuste (en este caso la constante K de la expresión teórica)

6.- Conclusiones.

Se han fabricado y medido guías ARROW curvas que presentan una atenuación debida a radiación en la curva inferior al decibelio por centímetro para radios de hasta 2 milímetros. Este valor las hace perfectamente adecuadas para el diseño de dispositivos ópticos integrados que necesiten la inclusión de guías curvas.

Las pérdidas intrínsecas de curvatura siguen una tendencia exponencial con el radio, como preveían los estudios teóricos, aunque el ajuste con dos parámetros libres no es muy exigente. Por esta razón, la información que se obtiene mediante un método de simulación numérica como el BPM-3D tiene mucho mayor interés a la hora de estimar las pérdidas que pueda presentar un futuro dispositivo. Sin embargo, los resultados de la simulación numérica deben utilizarse con precaución, teniendo en cuenta que se trata de una buena estimación pero que habitualmente infravalora las pérdidas de la guía curva.

Del mismo modo, las pérdidas por transición siguen, al menos en los rangos de radios de curvatura y anchura de *rib* utilizados, la conocida dependencia con R^2 prevista por el modelo ondulatorio. Sin embargo, el parámetro K de dicho modelo es un coeficiente de ajuste libre. Este hecho hace que las previsiones de la teoría de rayos, que no necesitan ningún tipo de parámetro de ajuste, sean mucho más valiosas a la hora de estimar el futuro comportamiento de una guía de ondas curva a fabricar. La exactitud de estas previsiones es suficiente dado el habitual margen de error en los procesos de fabricación, mayor que las desviaciones entre simulación y experimento observadas.

7.- Bibliografía.

- [1] "Optical Fiber Telecommunications IIIb". I. Editores I. Kaminow, T. Koch. Ed. Academic Press, 1997. Cap 8.
- [2] S. Suzuki, M. Yanagisawa, Y. Hibino, K. Oda. "High-Density Integrated Planar Lightwave Circuits Using SiO₂-GeO₂ Waveguides with a High Refractive Index Difference". J. Lightwave Technol. 12, 790-796, 1994.
- [3] B.H. Verbeek, E.C.M. Pennings, J.W.M. van Uffelen, P.J.A. Thijs. "Fabrication and analysis of low-loss InGaAsP/InP optical waveguides with extremely small bends". ECOC'89, Proc. Vol 3, Post-Deadline Pap., PDB-9, pp 78-81, 1989.
- [4] "Single-Mode Fibers. Fundamentals" E.G. Neumann. Ed. Springer Verlag, 1988. Cap 5.
- [5] J. Paniello. "Estudio Comparado de Resultados Obtenidos Mediante Modelización Teórica y Caracterización Experimental de Fibras Ópticas Monomodo". Tesis Doctoral, 1991.
- [6] E.G. Neumann, H.D. Rudolph "Radiation from Bends in Dielectric Rod Transmission Lines" IEEE Trans. MTT 23, pp. 142-149, 1975.
- [7] V. Subramaniam, G. N. De Brabander, D.H. Naghski, J.T. Boyd. "Measurement of Mode Field Profiles and Bending and Transition Losses in Curved Optical Channel Waveguides". J. Lightwave Technol. 15, 990-997, 1997.
- [8] W.A. Gambling, H. Matsamura. "Field Deformation in a curved single-mode fiber". Elect. Lett. 14, 130-132, 1978.
- [9] W. P. Huang, C. L. Xu, S. T. Chu, S. K. Chaudhuri. "A Vector Beam Propagation Method for Guided-Wave Optics". IEEE Phot. Tech. Lett. 3, 910-913, 1991.
- [10] M.K. Smit, E.C.M. Pennings, H. Blok. "A Normalized Approach to the Design of Low-Loss Optical Waveguide Bends". Journal of Lightwave Technology, vol. 11 n°11, pp. 1737 - 1742, 1993.