

# MODOS DE GALERIA OPTICA ESTUDIO TEORICO-EXPERIMENTAL

M. LOMER, J.M. LOPEZ-HIGUERA, J.L. ARCE

Universidad de Cantabria. Departamento de Electrónica-Grupo de Ingeniería Fotónica  
Av. de los Castros s/n, 39005 Santander Tel. 942-201495, Fax 942-201402

La propagación de ondas a lo largo de superficies curvas, descubierto por Rayleigh con ondas sonoras<sup>[1]</sup>, presenta actualmente un gran interés en la propagación de ondas radioeléctricas y ópticas. Este tipo de propagación, llamado modos de galería (Whispering Gallery Modes), es aplicado en diversos dominios de las guías de onda en superficies curvas: esféricas, cilíndricas, helicoidales, etc. La energía guiada se encuentra confinada, principalmente, en la proximidad de la interface entre dos medios de índice diferentes. El medio que contiene las ondas de galería pueden ser de material amorfo o cristalino, que pueden dar lugar al diseño y fabricación de componentes pasivos o activos respectivamente.

El modelo teórico utilizado es un cilindro dieléctrico, circular, transparente y homogéneo; de índice de refracción  $n_1$  y de radio  $R_1$  (figura 1). El cilindro es rodeado de un medio de índice  $n_0$  (aire por ejemplo). Considerando que en esta estructura se propaga un rayo luminoso en un plano normal al eje Oz, y que se desplaza en línea recta entre la superficie lateral ( $r = R_1$ ) y una superficie interior ( $r = R_0$ ) llamada cáustica, se pueden caracterizar cada punto de este rayo, en coordenadas cilíndricas, por el par  $r, \Psi$ . Debido a la discontinuidad de la interface  $n_0/n_1$ , el rayo puede sufrir una reflexión total sobre la superficie lateral externa a condición de que su ángulo de incidencia sea lo suficientemente grande. Todos los rayos, que describen trayectorias similares, se reflejan con el mismo ángulo de incidencia. La región  $R_1-R_0$  corresponde a la energía luminosa confinada y que es asociada a los rayos. Un cambio del ángulo de incidencia provoca una modificación del radio de la cáustica según la relación:  $R_0 = R_1 \cos \phi_i$ .  $\phi_i$  es el complemento del ángulo de incidencia.

El cálculo de los modos propios de galería tienen en cuenta los avances de fase observados por el rayo elemental, una de  $\Phi_{10}$  (interface  $n_0/n_1$ ) en la reflexión total y otra de  $\pi/2$  sobre la cáustica. Esta condición se traduce por la ecuación<sup>[2]</sup>:

$$k_0 n_1 \left[ \left( R_1^2 - R_0^2 \right)^{1/2} - R_0 \cos^{-1} \left( \frac{R_0}{R_1} \right) \right] = \Phi_{10} + \frac{\pi}{4} + m\pi \quad (1)$$

donde  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ .  $\lambda_0$  es la longitud de onda de la luz

El desarrollo limitado de la relación (1) permite obtener la expresión aproximada del radio de la cáustica  $R_{0m}$  en función del modo  $m$  propagado, sea TE o TM. Luego, se puede deducir el espesor radial  $\Delta R_m$  donde se encuentra confinada la energía del modo. Asimismo se deducen el ángulo  $\phi_{im}$  y el índice efectivo  $n_{em}$ . A partir de los resultados obtenidos, se pueden realizar todas las estimaciones de los modos de galería en función de los parámetros opto-geométricos, tales como: separación entre modos consecutivos, cantidad de modos, etc.

El cálculo de la distribución de campos son desarrollados a partir de las ecuaciones de Maxwell aplicadas al medio dieléctrico. La solución de ecuación son funciones de Bessel y que pueden ser resueltos por algoritmos conocidos. En nuestro caso se han utilizados teorías aproximadas, tales como la modelización a través de una guía plana equivalente con gradiente de índice, funciones de Airy o el método WKB<sup>[3]</sup>. En la figura 2 se muestra la distribución de campo eléctrico para una estructura de radio igual a 20 mm y de índice 1.47.

En la demostración experimental se ha utilizado un cilindro de sílice de  $R_1 = 20$  mm y de  $n_1 = 1.457$  (a  $0.6328 \mu\text{m}$ ). La excitación de modos de galería se ha realizado grabando una red de difracción en una capa delgada de resina fotosensible depositada en la parte lateral exterior del cilindro. La etapa siguiente ha sido la verificación de las características previstas en la parte teórica. El acoplamiento de modos tiene en cuenta el radio de curvatura y la propagación de los modos de galería. Para la estructura, la excitación de los primeros modos de produce para ángulos de incidencia del haz próximos a  $68^\circ$ , valor bastante cercano al previsto en la teoría.

En conclusión, el presente trabajo se ha demostrado, teórica y experimentalmente, la existencia de los modos de galería en una estructura cilíndrica transparente. Los diferentes métodos de cálculos utilizados han mostrado una coincidencia con teorías rigurosas. Las propiedades que los modos de galería ofrecen pueden ser utilizados en un sinfín de aplicaciones dentro del campo fotónico.

- [1] Lord RAYLEIGH. "The problem of the whispering gallery"  
Philos. Mag., Vol. 20, pp. 1001-1004, December 1910.
- [2] M. MIGAYI. "Bending losses in hollow and dielectric tube leaky waveguides"  
Applied Optics, Vol. 20, N° 7, pp. 1221-1229, 1981.
- [3] M. LOMER, "Contribution to the study of Whispering-Gallery optics",  
Ph. D Thesis, University of Limoges, France, July 1992.

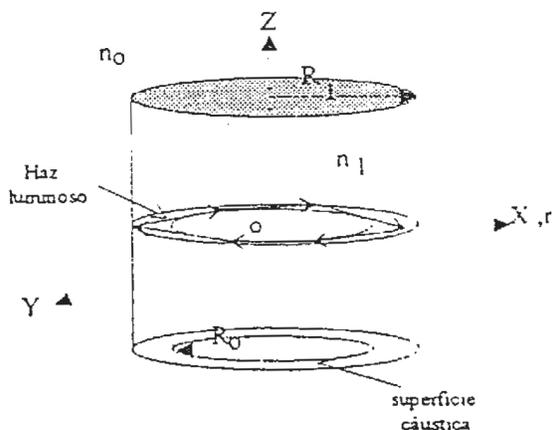


Fig. 1. Propagación de los modos de galería óptica en una estructura cilíndrica.

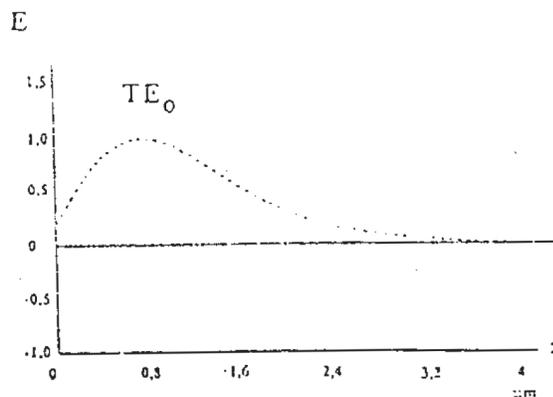


Figura 2. Distribución radial de los campos en un cilindro  $R_1 = 20$  mm  $n_1 = 1.47$ , para el modo  $m = 0$ .

Este trabajo ha sido soportado por el proyecto CICYT, TIC92-0052-CO2-02, a la que los autores muestran su agradecimiento.