

# Estudio experimental de guías de ondas mediante reflectometría interferométrica de baja coherencia

I. Salinas, I. Garcés, R. Alonso

Departamento de Física Aplicada. Universidad de Zaragoza.

Tf: 976762450. Fax: 976761233. E-mail: [isalinas@posta.unizar.es](mailto:isalinas@posta.unizar.es)

Áreas de interés: Micro Óptica y Óptica Integrada, Caracterización

Palabras clave: interferometría, guía de ondas, óptica integrada, estructura modal

## 1.- Introducción.

La resolución de las ecuaciones de Maxwell en guías de ondas es un problema sin solución analítica, salvo para los casos de simetría plana o cilíndrica. Ninguna de estas dos configuraciones es susceptible de ser utilizada en óptica integrada, donde los procesos de fabricación conducen habitualmente a guías de sección rectangular. El estudio de las distribuciones modales de estas guías debe abordarse mediante diversos métodos numéricos y aproximativos, que a menudo ofrecen resultados muy dispares [1].

La interferometría de baja coherencia proporciona una herramienta experimental idónea para estimar algunas características de estas guías de ondas, como son velocidades de grupo, índices efectivos e incluso pérdidas de los distintos modos presentes en la estructura.

En el presente trabajo se realizan este tipo de medidas en una fibra óptica de características conocidas con el objeto de evaluar la precisión del método empleado, para a continuación repetir el experimento en una guía rib ARROW sobre sustrato de silicio.

## 2.- Sistema experimental.

La figura 1 muestra un esquema del sistema reflectométrico empleado. En esencia se trata de un interferómetro en el que uno de los brazos recoge la luz retrodifundida por la

muestra problema y otro transporta la luz directamente de la fuente. Un motor paso a paso permite variar la longitud de uno de los caminos ópticos para que la luz que interfiere sea la correspondiente a distintos puntos de la muestra. A continuación se detallan los distintos componentes del sistema:

### 2.a.-Fuente

Como fuente se emplea un diodo superluminiscente (SLED) en 680 nm, cuya anchura espectral se aproxima a la de un LED (11 nm), pero con una potencia emitida en fibra monomodo cercana a 1 mW. Esto permite analizar la muestra con una alta resolución (la de la longitud de coherencia, 40  $\mu\text{m}$ ) pero manteniendo un nivel de intensidad de luz retrodifundida detectable.

### 2.b.-Detección

No es difícil suponer que la cantidad de luz presente en el brazo directo del interferómetro será varios órdenes de magnitud superior a la del brazo que recoge la luz retrodifundida en la muestra. Habrá por tanto un contraste muy pequeño, y la señal de interferencia será casi inapreciable frente al nivel continuo proveniente del brazo directo.

Pero este efecto puede evitarse introduciendo una modulación espacial en uno de los brazos con la ayuda de un piezoeléctrico. Al hacer oscilar el brazo se pasa de una condición de máximo a otra de mínimo de

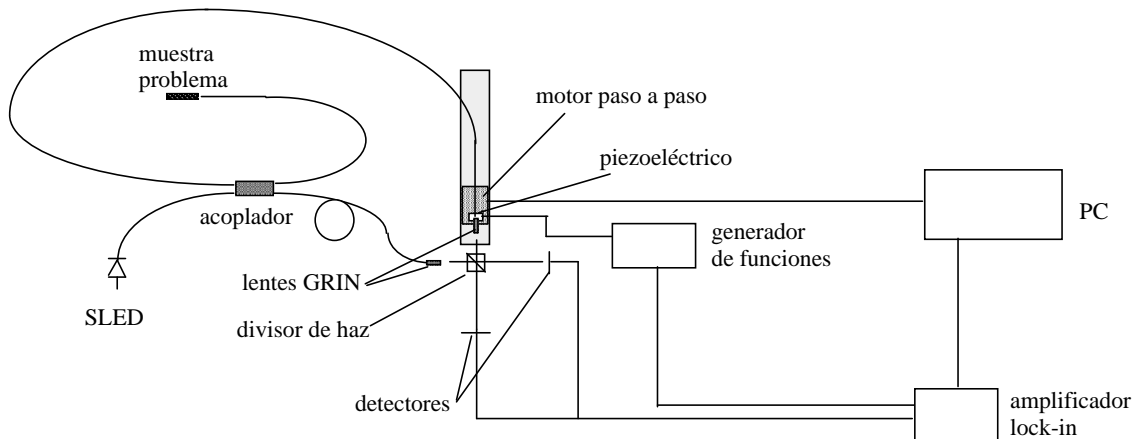


Figura 1: Esquema del reflectómetro interferométrico.

interferencia con una frecuencia proporcional a la que modula el piezoelectrico.

Esto permite realizar una detección mediante amplificador lock-in y eliminar de este modo el nivel continuo en la señal.

Para mejorar aún más el rango dinámico se detecta simultáneamente con dos detectores en ambas caras del divisor de haz y se realiza la resta de las dos señales obtenidas (que van en contrafase y por tanto se suman).

### 2.c.-Control del sistema

El control se realiza mediante un ordenador personal, que permite efectuar barridos en la muestra moviendo el motor paso a paso la distancia deseada y almacenando la lectura del amplificador en cada punto.

## 3.- Medidas en una fibra óptica

Para evaluar la eficacia de este método de medida, se han medido distintas magnitudes ya conocidas en pequeños tramos de fibra óptica utilizados como muestra problema. Como la longitud de onda empleada es de 680 nm, una fibra de núcleo de 9 micras de diámetro (monomodo para 1300 nm) presentará varios modos claramente diferenciados, y será posible realizar un estudio de las diferentes velocidades de propagación de los mismos.

Para ello se utiliza como muestra un tramo de unos pocos centímetros de dicha fibra, y se examina la luz retrodifundida en el extremo más alejado de la misma. Distintas velocidades de propagación implican distintas longitudes de camino óptico, y por tanto la luz perteneciente a cada uno de los modos, que se propaga con su propia velocidad de grupo, interferirá en diferentes posiciones del brazo móvil. La distancia espacial entre los máximos de

interferencia se corresponderá con la diferencia de velocidad de grupo entre los modos.

También es posible estudiar la distribución espacial de los distintos modos. Para ello, basta con desplazar lateralmente la fibra que inyecta luz en la muestra y comprobar la potencia relativa en cada modo excitado.

Los tramos de fibra empleados son de 2 y 3.7 cm. En el tramo más corto apenas hay tiempo de que las diferentes velocidades de grupo se hagan patentes (Fig. 2), pero al doblar la longitud de fibra se observan ya claramente los distintos modos.

Notar por último que en el caso de la fibra es necesario cubrir la muestra con líquido de índice, para evitar la presencia de modos que viajen por el recubrimiento de la fibra, que en la práctica desaparecerían en pocos centímetros pero que en estas pequeñas distancias aún están presentes y dificultan el análisis de la medida (Fig.3).

Inyectando en el centro se excitará prácticamente sólo el modo fundamental (Fig. 5.a), mientras que otras posiciones privilegiarán distintos modos secundarios. En la figura 5.b la fibra de entrada se ha desplazado de forma que la potencia de salida es ahora el 75 % de la potencia máxima, y ya pueden observarse pequeñas contribuciones de dos nuevos modos.

En las figuras 5.c y 5.d la potencia de salida es el 50 % y el 25 % de la máxima al aumentar el desplazamiento lateral de la posición de inyección. Esto hace que los modos secundarios vayan ganando peso relativo.

Por último, en la figura 5.e (12.5 % de la potencia) comienzan a aparecer modos probablemente de recubrimiento, ya que la fibra de entrada está ya muy desplazada con respecto al centro de la fibra que sirve de muestra.

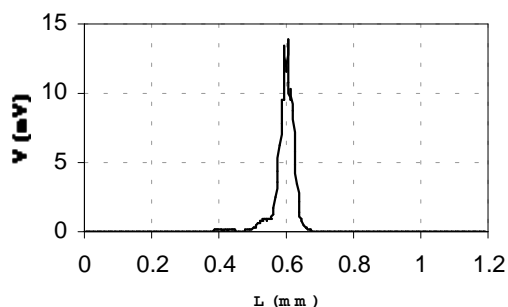


Figura 2. Fibra de 2 cm de longitud en la que el punto de inyección se ha desplazado. La escasa longitud de la muestra impide observar los distintos modos excitados.

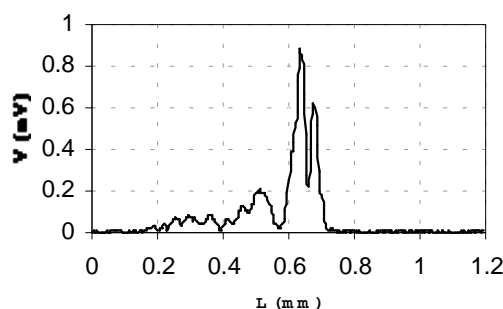


Figura 3. Los picos presentes en la parte izquierda de la gráfica corresponden a modos que viajan por el recubrimiento de la fibra.

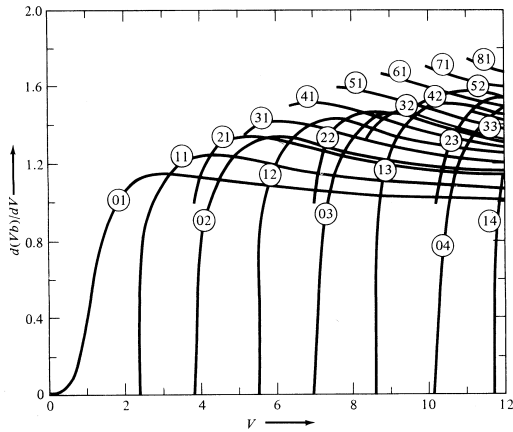
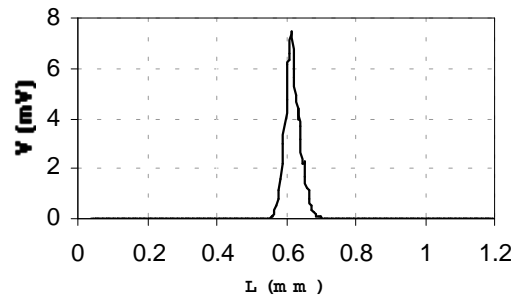
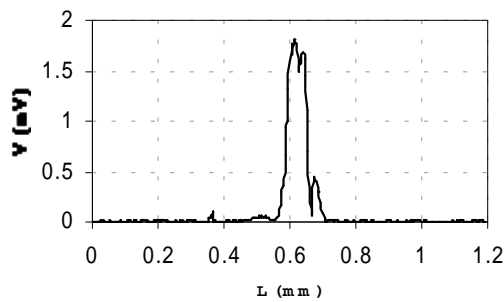


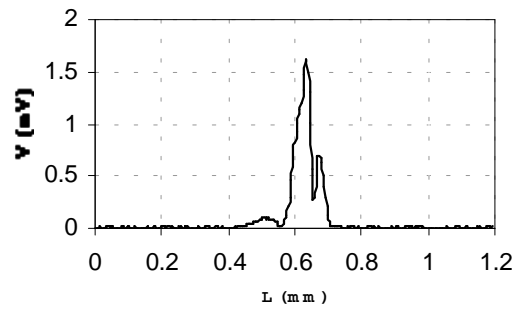
Figura 4. Retardo de grupo de los distintos modos LP de la fibra en función de  $V$  [2].



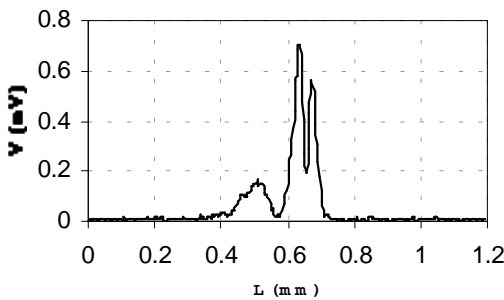
(a)



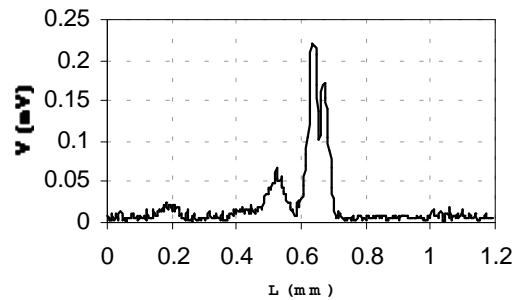
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5. Patrones de interferencia producidos por la luz guiada en una fibra óptica de 9 micras de núcleo y 3.7 cm de longitud para distintas posiciones de inyección: centrada (a), 75% de la potencia máxima (b), 50% (c), 25% (d) y 12.5% (e).

Un análisis más detallado de las figuras 5.b, c y d permite realizar algunas estimaciones sobre la naturaleza de los modos presentes en la fibra problema y compararlos con datos ya conocidos.

Pueden observarse tres picos claramente diferenciados, que deberían corresponder a los tres primeros modos guiados de la fibra ( $LP_{01}$ ,  $LP_{11}$ ,  $LP_{02}$ ).

El pico central puede asimilarse claramente al modo fundamental de la fibra ( $LP_{01}$ ), pues es el único presente cuando la inyección es central y el que transporta más potencia óptica.

El segundo pico en altura se encuentra a la derecha del fundamental, lo que en nuestro montaje equivale a un camino óptico más corto o una velocidad de grupo menor para ese modo. Su peso relativo aumenta al inicio del desplazamiento del punto de inyección y se mantiene estable al final, lo que podría indicar una estructura lobular, como la que de hecho posee el modo  $LP_{11}$ .

El tercer pico se encuentra a la izquierda del fundamental, es decir, corresponde a un modo que viaja con mayor velocidad de grupo. Su altura aumenta siempre con el desplazamiento del punto de inyección, lo que

se corresponde con una estructura anular tal y como la del modo LP<sub>02</sub>.

El estudio teórico de las características de la muestra coincide con estas estimaciones. En la figura 4 puede comprobarse que para un valor del parámetro V cercano a 4 existen cuatro modos en la fibra (LP<sub>01</sub>, LP<sub>11</sub>, LP<sub>02</sub> y LP<sub>21</sub>). El modo LP<sub>02</sub> tiene mayor velocidad de grupo (o un menor valor del parámetro d(Vb)/dV, que da idea de las diferencias de retardo de grupo [3]) que el fundamental. El modo LP<sub>21</sub> está degenerado en velocidad de grupo con el LP<sub>01</sub>, lo que hace que su contribución no se detecte en el experimento. La forma de estos modos es también la prevista según las medidas.

Además de este análisis cualitativo, es posible obtener algunos resultados cuantitativos. La diferencia entre los retardos de grupo  $\tau_g$  de los distintos modos puede relacionarse con la distancia recorrida por el motor paso a paso según la siguiente fórmula:

$$\Delta\tau_g = \frac{\Delta L}{c} \quad (1)$$

Y los valores obtenidos para  $\Delta L$  son los siguientes:

$$\begin{aligned} \text{LP}_{01} \text{ y } \text{LP}_{11} : \Delta L = 0.036 \text{ mm} &\rightarrow \Delta\tau_g = 12 \text{ ps} \\ \text{LP}_{01} \text{ y } \text{LP}_{02} : \Delta L = -0.124 \text{ mm} &\rightarrow \Delta\tau_g = 41 \text{ ps} \end{aligned}$$

Estos resultados pueden compararse con los calculados analíticamente según la fórmula indicada por Keiser [3]:

$$\Delta\tau_g = \frac{2L}{c} n_2 \Delta \left( \frac{d(Vb)}{dV} \right) \Delta_{indices} \quad (2)$$

Empleando los valores de d(Vb)/dV que se muestran en la figura 4 se obtienen los siguientes resultados:

$$\begin{aligned} \text{LP}_{01} \text{ y } \text{LP}_{11} : \Delta\tau_g &\approx 10.6 \text{ ps} \\ \text{LP}_{01} \text{ y } \text{LP}_{02} : \Delta\tau_g &\approx 42.6 \text{ ps} \end{aligned}$$

en clara consonancia con las medidas experimentales.

#### 4.- Medidas en una guía ARROW.

Es evidente que el verdadero interés del método de medida propuesto está en obtener datos sobre guías de ondas no resolubles analíticamente, como son las utilizadas generalmente en óptica integrada.

En concreto, se han realizado medidas sobre guías rib ARROW (Anti Resonant Reflecting Optical Waveguide) sobre sustrato de silicio, fabricadas en el Centro Nacional de

Microelectrónica de Barcelona. La sección de estas guías es rectangular, en este caso un núcleo de 20 x 4 micras (Figura 6)

En esta ocasión la estructura modal ya no es tan clara como en el caso de las fibras. De hecho, el máximo de potencia transmitida ya no se consigue cuando la inyección se realiza por el centro de la guía, sino en una posición algo desplazada, que permite la excitación de otros modos además del fundamental (Figura 6.b). Además, los máximos son ahora menos nítidos y más anchos, y aparecen abundantes picos secundarios de pequeña intensidad.

No obstante, los picos que indican la presencia de soluciones modales con una velocidad de propagación propia siguen apareciendo en posiciones definidas al variar las condiciones de inyección.

Puede observarse claramente la presencia de dos modos principales, uno de los cuales tiene su máximo cuando la excitación es central (figura 6.a) y otro que aumenta su contribución relativa al desplazar la posición de inyección hacia el extremo, hasta ser el predominante (figura 6.c). Esto es señal de una estructura central en el primer caso y lobular en el segundo. A partir de la figura 6.c aparecen nuevos modos que viajan más rápido que el fundamental, y que probablemente se propaguen por el recubrimiento. Estos modos son los predominantes cuando el desplazamiento es grande (figura 6.d)

En cuanto a la obtención de resultados cuantitativos, es posible estimar el índice de grupo de la guía midiendo la distancia entre los picos de reflexión que se producen en ambos extremos de la misma. Dado que la distancia  $L_{op}$  que obtenemos es el camino óptico entre las caras de la guía, el índice efectivo será el cociente entre esa distancia y el camino físico (dos veces la longitud de la guía):

$$n_g = \frac{L_{op}}{2L} \quad (3)$$

En este caso,  $L_{op}=61.4$  mm y  $L=40$  mm, lo que da un valor de  $n_g=1.535$  (para el modo fundamental, dado que medimos la distancia entre los picos principales).

La distancia entre los dos picos es  $\Delta L=0.115$  mm, lo que da lugar a una variación del índice de grupo de:

$$\Delta n_g = \frac{\Delta L_{op}}{2L} = 2.9 \cdot 10^{-3}$$

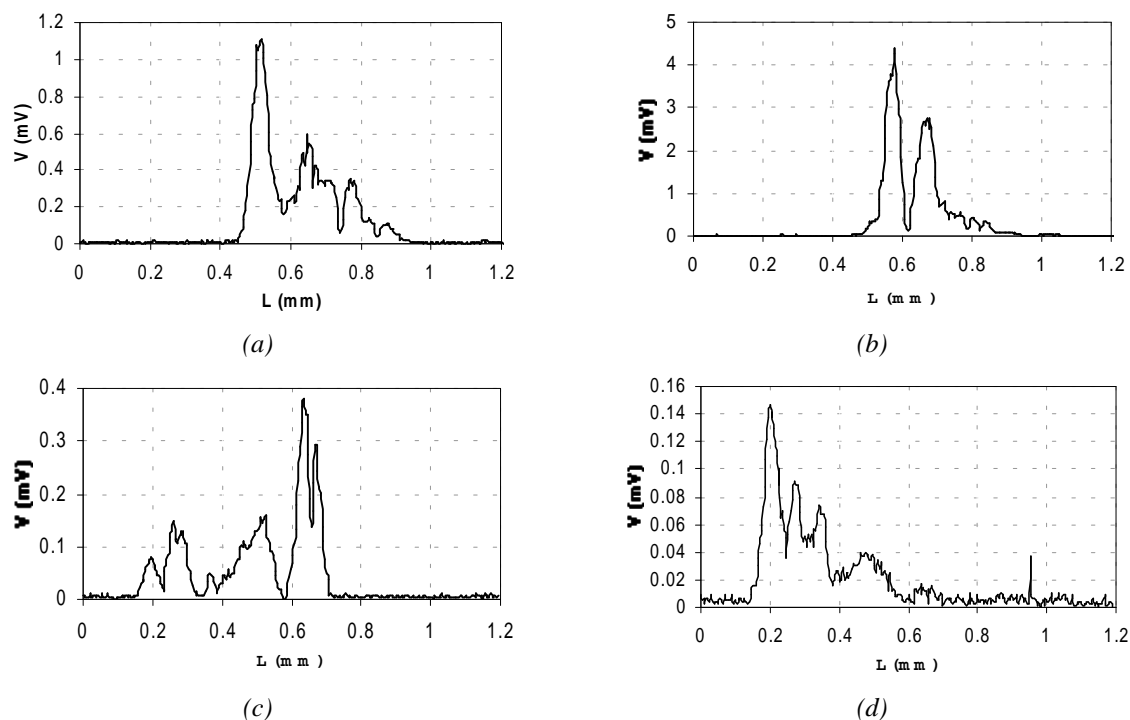


Figura 6. Patrones de interferencia producidos por la luz guiada en una guía rib ARROW de 20x4 micras de núcleo y 2.0 cm de longitud para distintas posiciones de inyección: centrada (a), potencia máxima (b), 50% de la potencia máxima (c) y 25% (d).

## 5.- Conclusiones

Se ha desarrollado un sistema experimental basado en interferometría de baja coherencia que permite realizar medidas experimentales de parámetros habitualmente sólo accesibles mediante cálculos teóricos o simulaciones numéricas.

Este método ha sido probado en una guía de ondas de características sobradamente conocidas, como es una fibra óptica monomodo para 1300 nm de tipo estándar, y se han obtenido resultados coincidentes con la teoría.

Posteriormente, se ha realizado el análisis de una guía rib ARROW sobre sustrato de silicio y se ha obtenido información experimental sobre el comportamiento modal de dicha guía. Esta información es principalmente de tipo cualitativo, acerca del número y forma de los distintos modos.

Actualmente se están realizando distintas series de medidas en guías ARROW con este montaje con el objeto de obtener una caracterización más precisa de la estructura de sus modos. El objetivo final de esta investigación es conseguir estudiar las pérdidas producidas en cada punto de la guía por procesos de *scattering* debidos a defectos de fabricación (cada defecto producirá un pico de reflexión proporcional a la luz que difunde en dirección contraria a la de propagación) [4]. También podrá conocerse si dicho *scattering* varía al cambiar las condiciones de guiado,

como por ejemplo con la introducción de curvaturas. Este objetivo exige aumentar la relación señal-ruido del sistema hasta poder detectar la luz retrodifundida en cualquier punto de la guía y no sólo en sus caras, para lo cual se están introduciendo mejoras en la estabilidad del reflectómetro y el tratamiento de la señal.

## 6.- Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) mediante el proyecto TIC97-0594-C04.

Las guías rib ARROW utilizadas en el estudio han sido proporcionadas por Carlos Domínguez y Andreu Llobera (Centro Nacional de Microelectrónica de Barcelona – CSIC).

## 7.- Bibliografía

- [1] Nolting, H. et al. "Results of Benchmark Tests for Different Numerical BPM Algorithms". Proc. Europto'94, pp 275-295.
- [2] Gloge, D. "Dispersion in weakly guiding fibers" Appl. Opt., 1971, 10, pp 2442-2445
- [3] "Optical Fiber Communications" G. Keiser, Ed. Mc Graw-Hill, 1991. Cap. 3, p. 104.
- [4] Takada, K. Mitachi, S. "Polarization Cross-talk Dependence on Length in Silica-Based Wave-Guides Measured by Using Optical Low-Coherence Interference" J. Lightwave Tech., 1998, 16, 1413-1422.