

PRACTICA 4

ESTUDIO DE MODOS QUE SE PROPAGAN POR UNA FIBRA ÓPTICA DE SALTO DE ÍNDICE

4.1 Introducción

En la práctica anterior hemos estudiado la propagación del modo fundamental en una fibra óptica de salto de índice (de forma teórica) y en el espacio libre y hemos visto que en general se le podía suponer una distribución de potencia gaussiana.

En este caso vamos a estudiar un nuevo formalismo matemático que ya introdujimos en la práctica anterior, que es el de modo débilmente guiado. Este formalismo es adecuado cuando se verifica la aproximación de guiado débil, que consiste en que la diferencia relativa entre los índices de refracción de núcleo y recubrimiento es muy pequeña: $\Delta \rightarrow 0$, donde $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_2}$. Para ello trabajaremos con una fibra diseñada para verificar la condición "monomodo" cuando trabajamos en la segunda ventana de transmisión ($\lambda \simeq 1.33\mu m$); el hecho de utilizar un láser de una longitud de onda sensiblemente menor hace que la fibra soporte la propagación de más modos que el fundamental.

La realización de la práctica consiste, básicamente, en alterar las condiciones de iluminación de la fibra óptica, de manera que se varíe la potencia acoplada a cada uno de los modos que se propagan. El contenido modal del campo se puede determinar de

manera aproximada inspeccionando el campo a la salida de la fibra. Los principales objetivos de la práctica son:

- Estudio del contenido modal del campo propagado en función de las condiciones de acoplamiento a la fibra óptica.

4.2 Introducción al guiado débil y modos linealmente polarizados

En esta práctica sólo introduciremos ligeramente el formalismo de los modos linealmente polarizados para, en la siguiente práctica, entrar con mayor detalle a estudiarlos.

El estudio de los diagramas de dispersión de una fibra óptica cilíndrica de salto de índice, en los que normalmente se representa la *constante de propagación normalizada* ($b = \frac{(\beta/k_0)^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2}$) frente a la *frecuencia normalizada* ($V = k_0 a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$), nos permite comprobar que existen algunos grupos de modos que son aproximadamente degenerados, esto es, que sus respectivas constantes de propagación son muy parecidas. En las figuras 4.1 y 4.2 se puede observar los diagramas de dispersión para una fibra sin guiado débil y bajo la hipótesis de guiado débil respectivamente. Se observa como parte de las curvas "desaparecen" y se convierten en una sola. A medida que Δ se va haciendo más y más pequeño, esta degeneración se va acentuando, siendo completa en el límite $\Delta \rightarrow 0$.

Una forma habitual de introducir el formalismo de los modos LP consiste en partir de las expresiones exactas para los modos propagados en la fibra, agrupándolos convenientemente (por ejemplo, los modos $HE_{l+1,m}$ y $EH_{l-1,m}$, con $l \geq 2$ para obtener los modos $LP_{l,m}$). A partir de combinaciones lineales de estos modos se obtienen nuevas expresiones que, al serles aplicadas la condición de guiado débil nos proporcionan los modos LP . Estas soluciones aproximadas del problema de propagación en una guía cilíndrica presentan las siguientes propiedades:

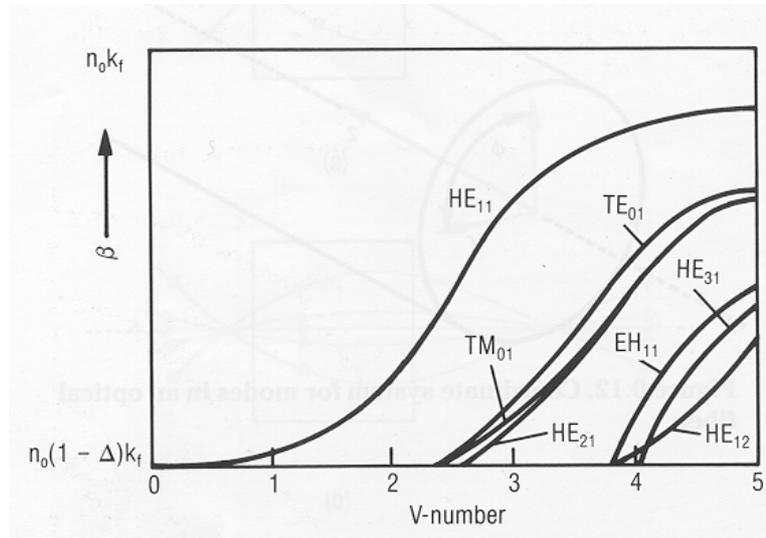


FIGURA 4.1. Gráfica de dispersión de modos en una fibra.

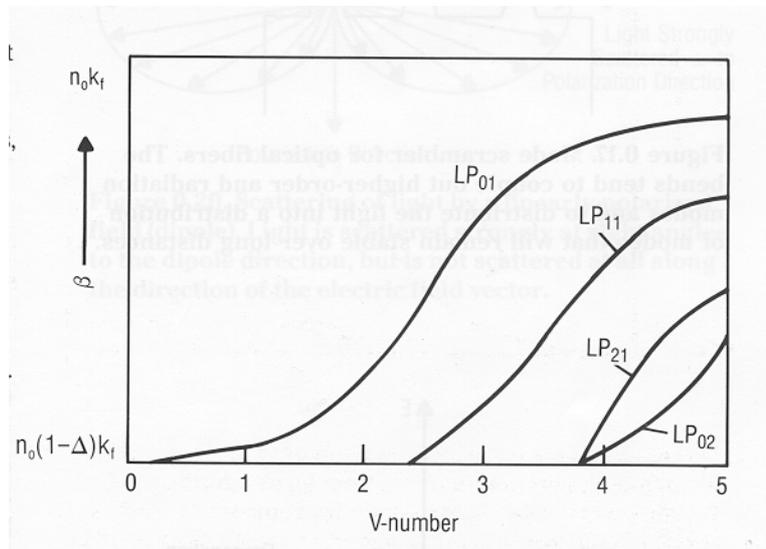


FIGURA 4.2. Gráfica de dispersión de modos en una fibra bajo la hipótesis de guiado débil.

- Las componentes de los campos en la dirección de propagación son despreciables en relación con las componentes contenidas en el plano transversal.
- Los campos en el plano transversal están linealmente polarizados.
- Tenemos modos *casi – TEM* en los que se verifica la relación:

$$H_{\perp} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n \hat{z} \times E_{\perp} \quad (4.1)$$

donde E_{\perp} , H_{\perp} son las componentes transversales del campo y $n \simeq n_1 \simeq n_2$.

La obtención del formalismo *LP* a partir de las expresiones exactas para los campos modales en la fibra óptica se realizará en la siguiente práctica. En esta práctica sólo nos interesa si las soluciones matemáticas que así aparecen pueden, de alguna forma, ser comprobadas experimentalmente.

4.3 Visualización de modos linealmente polarizados en el laboratorio

Para la visualización de los modos linealmente polarizados en el laboratorio vamos a utilizar una fibra con parámetro $V < 2.405$ en la segunda ventana ($\lambda = 1330 \text{ nm}$). Como se puede ver en la figura 4.1, en este caso la fibra es monomodo. Pero hay que tener en cuenta, que el parámetro V tal y como fue definido más arriba es dependiente de la longitud de onda, esto es, el que la fibra sea monomodo para la longitud de onda elegida para la transmisión no quiere decir que sea monomodo para todas las longitudes de onda. La fibra que utilizamos, *Newport F-SS*, tiene en concreto como características tener una NA de 0.11 y un núcleo de radio $4 \mu\text{m}$. Para una longitud de onda de 1300 nm , $V = 2.13$ Sin embargo, a 633 nm , el valor de V es de 4.39. Este simple hecho, como se puede de nuevo ver en la figura 4.1, hace que la guía a esa longitud de onda no sea monomodo, sino que puede guiar un número reducido de modos. Pero además esta fibra se caracteriza por ser de guiado

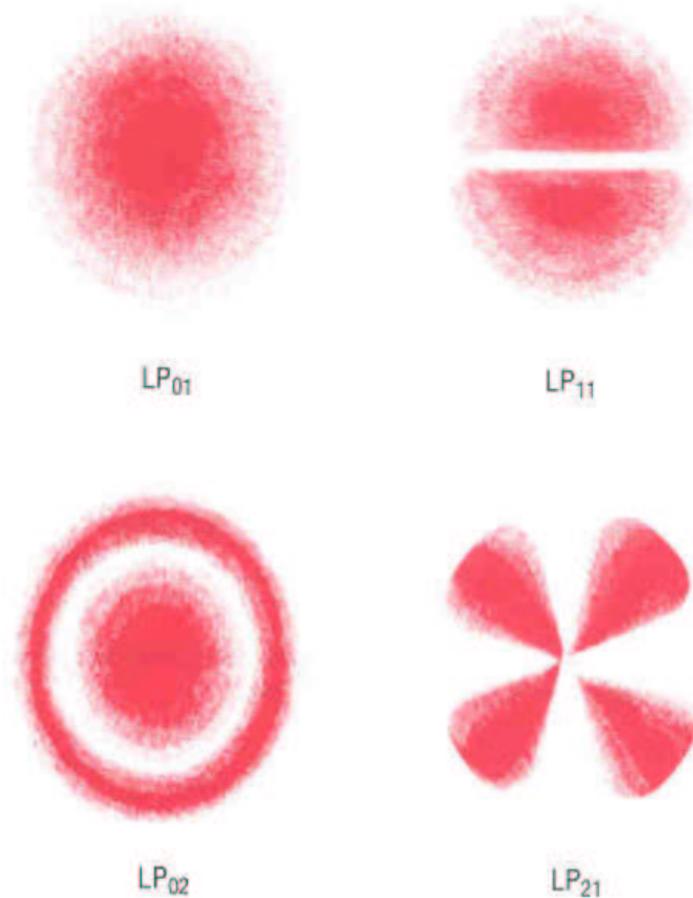


FIGURA 4.3. Patrón de intensidad de algunos modos linealmente polarizados.

débil, con lo que sería más apropiado referirse a la figura 4.2, para ver los modos que se propagan por la fibra. Para ser exactos, bajo estas condiciones se propagan cuatro modos linealmente polarizados: LP_{01} , LP_{11} , LP_{02} , LP_{21} . Estos modos tienen la particularidad de tener un patrón de intensidad muy característico el cual se puede observar en la figura 4.3.

Lo que queda saber es si seremos capaces de acoplar la luz a la fibra, de tal forma que a la salida podamos ver alguno de estos patrones, y por lo tanto identificar los modos que se están propagando por ella. Para ello hay que estudiar las condiciones de iluminación de la fibra.

4.4 Condiciones de iluminación

Supongamos un campo incidente (por ejemplo, en forma de haz gaussiano) desde el aire sobre el extremo de una fibra óptica. A partir de la distribución de la iluminación es necesario calcular el campo transmitido en la fibra. Este cálculo es, en general, laborioso, ya que es necesario tener en cuenta la distribución espacial de la iluminación, su polarización, y la no homogeneidad del espacio en la fibra óptica. Sin embargo, bajo determinadas circunstancias, es posible simplificar los cálculos considerablemente:

- En condiciones de guiado débil ($n_1 \simeq n_2$) podemos aproximar la fibra por un medio homogéneo.
- Si las dimensiones espaciales de la iluminación son mucho mayores que la longitud de onda, es posible considerar que el campo incidente se comporta aproximadamente como una onda plana, dado que el espectro angular del haz es muy estrecho.
- Si, además de las condiciones anteriores, se verifica que la dirección de incidencia está muy próxima a la normal a la fibra y el campo incidente está polarizado perpendicularmente a la dirección de propagación, podemos emplear las fórmulas de Fresnel para incidencia normal de una onda plana como una aproximación gruesa para calcular el campo transmitido en la fibra. Así, si E_i y H_i son las distribuciones del campo incidente, tendríamos que, en primera aproximación (válida en un número limitado de situaciones), el campo en la fibra vendría dado por

$$E_t \simeq \frac{2n_0}{n_0 + n_1} E_i$$

$$H_t \simeq \frac{2n_1}{n_0 + n_1} H_i$$

El campo acoplado a la fibra puede ser representado en la base formada por el conjunto discreto de modos confinados y el continuo de modos radiados, de manera

que podemos expresar la distribución espacial del campo acoplado como

$$E_t(x, y) = \sum a_j e_j(x, y) + \mathfrak{R}(x, y)$$

donde $e_j(x, y)$ es la distribución espacial del campo eléctrico del modo j -ésimo y $\mathfrak{R}(x, y)$ es la integral de radiación. Para la distribución del campo magnético tendríamos una expresión similar. Los coeficientes a_j nos dicen qué porcentaje de la potencia total se acopla a cada uno de los modos; son, en definitiva, las coordenadas del campo en la base formada por los modos de la fibra. Para calcular su valor tendremos en cuenta las relaciones de ortogonalidad entre los distintos modos,

$$\iint e_i \times h_j^* \cdot \hat{z} dS = \delta_{i,j}$$

donde la integración se efectúa sobre todo el plano transversal y hemos supuesto que las expresiones de los campos están convenientemente normalizadas. Tenga en cuenta que el hecho de tener modos ortogonales entre sí y que todo posible campo que se propague dentro de la fibra se puede poner necesariamente como combinación lineal de estos modos (puesto que son las soluciones de las ecuaciones de Maxwell) son condición necesaria y suficiente para definir a estos modos como una base de un espacio algebraico, donde los vectores del espacio son los campos que se propagan por la fibra, y cada uno de esos campos se puede representar de forma **única** como combinación lineal de los vectores de la base, es decir, nuestros modos. Tenemos pues que para calcular el contenido del campo propagado en relación a uno de los modos que se propagan basta con proyectar el campo acoplado sobre la base formada por los modos confinados de la fibra óptica (tal y como se hace en álgebra para determinar las coordenadas de un vector, o dicho de otra forma, la potencia con la que se propaga cada uno de los modos serían las coordenadas de nuestro campo original y la base que hemos definido). Teniendo en cuenta la relación que verifican las distribuciones de los campos eléctrico y magnético en el caso de guiado débil (ecuación 4.1), las expresiones de los coeficientes de acoplo a cada uno de los modos vendrán dados

por:

$$a_j = \frac{\iint E_{x,t}(x,y)e_{x,j}^*(x,y)dS}{\iint |e_x(x,y)|^2 dS} \quad (4.2)$$

suponiendo una iluminación polarizada en la dirección \hat{x} .

A partir de la expresión 4.1 se deduce que variando las condiciones de iluminación, $E_{x,t}(x,y)$, podemos modificar el contenido modal del campo propagado. El objetivo de esta práctica es, precisamente, jugar con la integral anterior de manera que modificando el ángulo de incidencia, posición respecto al eje de la fibra y el tamaño de la iluminación podemos seleccionar (en la medida de lo posible) cada uno de los modos que se propagan.

4.5 Material necesario para la práctica

Para el desarrollo de esta práctica es necesario el siguiente material:

- XSN-22
- U-1101P
- 807
- 340RC
- 41
- F-916
- M-20X
- F-CL1
- F-BK2
- FX-BLX

- SK-25
- VPH-2: 2 unidades
- SP-2: 2 unidades
- FP-1
- F-SS-20: Fibra monomodo a longitud de onda de segunda ventana
- M-40X: Lente de 40 aumentos
- MH-2PM: Posicionador óptico

4.6 Instrucciones para la realización de la práctica

4.6.1 Introducción

En la Figura 4.4 se observa una fotografía del montaje de laboratorio para la realización de la práctica. La radiación del láser se acopla en la fibra mediante un objetivo de microscopio como ya se hizo en prácticas anteriores.

4.6.2 Montaje de la práctica

1. Monte el láser como ya ha hecho en otras ocasiones.
2. Monte la etapa de alineamiento F-916, tal y como se le ha explicado en prácticas anteriores y rosque el objetivo en la etapa de alineamiento.
3. Inserte el extremo final de la fibra dentro del posicionador FP-1 y este en un poste. Inserte la lente de 40 aumentos en el dispositivo MH-2PM, tal y como se ve en la Figura 4.4.
4. Use la lente para visionar la salida del final de fibra en una superficie convenientemente cercana. Unos tres metros es una distancia conveniente.

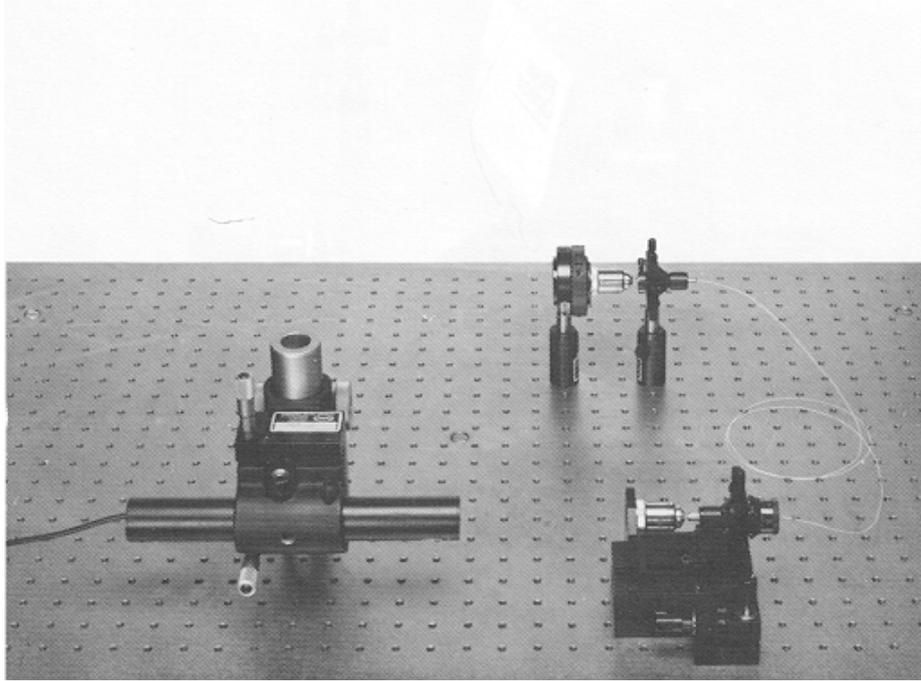


FIGURA 4.4. Montaje en el laboratorio para poder visualizar los modos LP

5. Examine esta proyección de la distribución del campo de la fibra. Cambie el ajuste x - y del dispositivo F-916. Esto tiene el efecto de cambiar la posición y ángulo de lanzamiento del rayo láser enfocado en la fibra. Note como esto causa que la distribución de campo de la fibra cambie.
6. Dibuje las imágenes que está obteniendo. Comparelas con las distribuciones LP_{lm} que aparecen en la Figura 4.3. Identifique los patrones que parecen ser modos LP_{lm} puros y aquéllos que son combinaciones de dos o más modos LP_{lm} . Para cada modo que crea haber localizado avise al profesor.