

(19)



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS
ESPAÑA



(11) Número de publicación: **2 897 829**

(51) Int. Cl.:

G02B 6/028 (2006.01)

G02B 6/036 (2006.01)

(12)

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.05.2010 E 10164095 (1)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.08.2021 EP 2259105**

(54) Título: **Fibra óptica multimodo de ancho de banda muy amplio con una interfaz de revestimiento de núcleo optimizada y efecto de revestimiento reducido**

(30) Prioridad:

**05.06.2009 FR 0902724
09.06.2009 US 185462 P**

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
02.03.2022

(73) Titular/es:

**DRAKA COMTEQ B.V. (100.0%)
Schieweg 9
2627 AN Delft, NL**

(72) Inventor/es:

**MOLIN, DENIS;
DE JONGH, KOEN;
SILLARD, PIERRE y
LUMINEAU, YVES**

(74) Agente/Representante:

DE ARPE TEJERO, Manuel

ES 2 897 829 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Fibra óptica multimodo de ancho de banda muy amplio con una interfaz de revestimiento de núcleo optimizada y efecto de revestimiento reducido

La presente invención se refiere al campo de la transmisión mediante fibras ópticas, y, más específicamente, a una fibra óptica multimodo para aplicaciones de alto ancho de banda.

Convencionalmente, una fibra óptica está compuesta de un núcleo óptico que tiene la función de transmitir y, opcionalmente, amplificar una señal óptica, y un revestimiento óptico que tiene la función de confinar la señal óptica dentro del núcleo óptico. Para este fin, los índices de refracción del núcleo n_c y del revestimiento n_g son de manera que $n_c > n_g$.

10 El perfil de índice de refracción indica el gráfico que la función que asocia el índice de refracción con el radio de la fibra. Convencionalmente, la distancia al centro de la fibra se muestra en el eje x, y la diferencia entre el índice de refracción a esa distancia específica y el índice de refracción del revestimiento de la fibra en el eje y. En general, el perfil de índice de refracción se califica de acuerdo con su apariencia. Por lo tanto, el perfil de índice de refracción se describe en términos de un "escalón", "trapezio", "triángulo" o "alfa" para gráficos que tienen formas escalonadas, 15 trapezoidales, triangulares o graduales, respectivamente. Estas curvas son representativas del perfil teórico o establecido de la fibra, mientras que las restricciones de fabricación de la fibra pueden dar como resultado un perfil ligeramente diferente.

20 Existen dos tipos de fibras ópticas principales, a saber, fibras multimodo y fibras monomodo. En una fibra multimodo, para una longitud de onda dada, se propagan varios modos ópticos de manera simultánea a lo largo de la fibra, mientras que en una fibra monomodo los modos de un orden superior están atenuados de manera intensa. El diámetro típico de una fibra óptica mono modo o multimodo es de $125 \mu\text{m}$. El núcleo de una fibra multimodo típicamente tiene un diámetro de $50 \mu\text{m}$ o $62,5 \mu\text{m}$, mientras que el núcleo de una fibra monomodo en general tiene un diámetro de aproximadamente $6 \mu\text{m}$ a $9 \mu\text{m}$. Los sistemas multimodo son menos costosos que los sistemas monomodo, puesto que las fuentes, los conectores y el mantenimiento tiene un coste inferior.

25 Las fibras multimodo se usan comúnmente para aplicaciones de corta distancia, tales como redes locales o LAN (red de área local), que requieren un ancho de banda amplio. Las fibras multimodo han sido el objeto de una normalización internacional bajo la norma ITU-T G.651.1 que define los criterios particulares del ancho de banda, la apertura numérica (definida como la raíz cuadrada de la diferencia entre el índice de refracción máximo cuadrado del perfil de índice del núcleo, y el índice de refracción cuadrado del revestimiento), y el diámetro de núcleo, para el fin de 30 compatibilidad entre fibras. Además, se ha adoptado la norma OM3 para satisfacer aplicaciones de alto ancho de banda (es decir, una tasa de datos superior a 1GbE) a través de largas distancias (es decir una distancia de más de 300 m). Con el desarrollo de aplicaciones de alto ancho debanda, el diámetro de núcleo promedio para fibras monomodo se ha reducido de $62,5 \mu\text{m}$ a $50 \mu\text{m}$.

35 Una fibra debe tener el ancho de banda más amplio posible para que pueda usarse en una aplicación de alto ancho de banda. El ancho de banda de una fibra está caracterizado por una longitud de onda dada de varias maneras diferentes, que se explicará posteriormente. Se realiza una distinción entre el ancho de banda en la denominada condición de OFL o "lanzamiento sobrecargado", y la denominada condición de EMB o "Ancho de Banda Modal Efectivo". La adquisición del ancho de banda OFL asume el uso de una fuente de luz que muestra una excitación uniforme sobre la superficie radial entera de la fibra, por ejemplo, un diodo láser o LED (Diodo de Emisión de Luz). Sin embargo, las fuentes de luz recientemente desarrolladas usadas en aplicaciones de alto ancho de banda, tales como VCSEL (Láseres de Emisión Superficial de Cavidad Vertical), muestran una excitación homogénea a través de la superficie radial de la fibra. Para este tipo de fuente de luz, el ancho de banda OFL es menos adecuado y se prefiere en este caso para usar la condición de ancho de banda modal efectivo o EMB. El ancho de banda efectivo calculado o EMB, estima el EMB mínimo de una fibra multimodo independiente del tipo de VCSEL usado. El EMB se obtiene de 40 una medición de DMD (Retardo de Modo de Dispersión) de una manera conocida *de por sí*.

45 La Figura 1 muestra un diagrama esquemático de una medición de DMD de acuerdo con el criterio de la norma FOTP-220 según se publica en su versión TIA SCFO-6.6 22 de noviembre de 2002. La Figura 1 muestra una representación esquemática de una parte de una fibra óptica, que es un núcleo óptico rodeado por un revestimiento óptico. Se obtiene un gráfico de DMD inyectando sucesivamente en la fibra multimodo un pulso de luz que tiene una longitud de onda dada λ_0 con un desplazamiento radial entre cada pulso sucesivo, y midiendo el retardo de cada pulso después de una longitud dada de la fibra L . El mismo pulso de luz se inyecta con diferentes desplazamientos radiales con respecto al centro del núcleo de la fibra óptica multimodo. El pulso de luz inyectado con un cierto desplazamiento radial se representa en la Figura 1 como un punto negro en el núcleo óptico de la fibra óptica. Para caracterizar una fibra óptica con un diámetro de $50 \mu\text{m}$, la norma FOTP-220 requiere que se lleven a cabo 24 mediciones individuales, cada una de las cuales para un desplazamiento radial diferente. A partir de estas mediciones, es posible deducir la dispersión modal de DMD, y el ancho de banda modal efectivo calculado EMB de una manera conocida *de por sí*.

50 La norma TIA-492AAAC-A especifica los rendimientos requeridos para aplicaciones de red de transmisión de alto ancho de banda de Ethernet a través de largas distancias para **fibras multimodo con un diámetro de $50 \mu\text{m}$** . La

norma OM3 garantiza una EMB superior o igual a 2000 MHz.km a 850 nm para obtener transmisiones sin errores para una tasa de datos de 10 Gb/s (10 GbE) hasta una distancia de 300 m. La norma OM4 debe garantizar una EMB superior o igual a 4700 MHz.km a 850 nm para obtener transmisiones sin errores para una tasa de datos de 10 Gb/s (10 GbE) de hasta una distancia de 550 m.

- 5 En una fibra multimodo, el ancho de banda resulta de la diferencia entre los tiempos de propagación o tiempos de retardo de grupo de los varios modos a lo largo de la fibra. En particular, para el mismo medio de propagación (es decir, en una fibra multimodo de tipo de índice de etapa), los diferentes modos tienen tiempos de retardo de grupo que son diferentes. Esta diferencia en los tiempos de retardo de grupo da como resultado un retraso de tiempo entre los pulsos que se propaga a lo largo de diferentes direcciones radiales de la fibra. Por ejemplo, en la Figura 1, se observa un retraso de tiempo entre los pulsos individuales, como puede observarse en el gráfico en el lado derecho de la Figura 1, donde cada trazo es un pulso individual y se representa el tiempo en nanosegundos en el eje x para cada pulso con el desplazamiento radial en micrómetros en el eje y. Es visible que hay una diferencia en los picos lo que significa un retraso de tiempo entre los pulsos individuales. Este retraso de tiempo provoca un ensanchamiento del pulso de luz resultante. Este ensanchamiento proporciona el riesgo de que este pulso se superponga en un siguiente pulso, y, por lo tanto, el riesgo de reducir la tasa de datos, por lo tanto, el ancho de banda, soportado por la fibra. El ancho de banda, por lo tanto, está vinculado directamente al tiempo de retardo de grupo de los modos ópticos que se propagan en el núcleo multimodo de la fibra. Para garantizar un ancho de banda amplio, es necesario que los tiempos de retardo de grupo de todos los modos sean idénticos, es decir, para que la dispersión intermodal sea cero, o para que al menos se minimice, para una longitud de onda dada. Para reducir la dispersión intermodal en una fibra multimodo, se ha propuesto producir fibras de índice gradual con un perfil de núcleo "alfa". Se ha usado una fibra de este tipo durante un número de años y sus características, en particular, se han descrito en "Multimode theory of graded-core fibres" por D. Gloge y col., Bell system Technical Journal 1973, pág. 1563-1578, y se resume en "Comprehensive theory of dispersion in graded-index optical fibers" por G. Yabre, Journal of Lightwave Technology, febrero de 2000, Vol. 18, N.º 2, págs. 166-177.
- 10
- 15
- 20
- 25 Puede definirse un perfil de índice gradual, o perfil de índice alfa, estos dos términos son equivalentes, por una relación entre el valor de índice n en un punto como una función de la distancia r desde este punto al centro de la fibra de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$n = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha}$$

- 30 núcleo multimodo;
a, el radio del núcleo multimodo; y

$$\Delta = \frac{(n_1^2 - n_0^2)}{2n_1^2}$$

donde n_0 es el índice mínimo del núcleo multimodo, que corresponde en general al índice del revestimiento (la mayor parte de las veces fabricado de sílice).

- 35 Una fibra multimodo con un índice gradual, por lo tanto, tiene un perfil de núcleo con una simetría rotacional de manera que a lo largo de cualquier dirección radial de la fibra el valor del índice de refracción se reduce continuamente pasando desde el centro de la fibra hasta su periferia. Cuando una señal de luz multimodo se propaga en un núcleo de índice gradual de este tipo, los diferentes modos ópticos experimentan un medio de propagación diferente (debido al diferente índice de refracción), que afecta a su velocidad de propagación de manera diferente. Ajustando el valor del parámetro α , por lo tanto, es posible obtener un tiempo de retardo de grupo que es virtualmente igual para todos los modos y, por lo tanto, una dispersión intermodal reducida o incluso cero.

- 40
- 45
- 50 Sin embargo, el perfil de índice de refracción de la fibra multimodo realmente producida comprende un núcleo central con índice gradual rodeado por un revestimiento exterior de índice constante. Por lo tanto, el núcleo de la fibra de multimodo nunca corresponde a un perfil alfa perfecto puesto que la interfaz del núcleo (que tiene un perfil alfa) con el revestimiento exterior (que tiene un índice constante) interrumpe este perfil alfa. Este revestimiento óptico exterior acelera modos de orden superior con respecto a los modos de orden inferior. Este fenómeno, conocido por la expresión "efecto de revestimiento", puede observarse en el gráfico de las mediciones de DMD presentadas en la Figura 2. Se observa que, las respuestas obtenidas para las posiciones radiales más altas (es decir, un desplazamiento radial alto, por ejemplo, por encima de 20 micrómetros) entonces muestran múltiples pulsos. Estos pulsos son debido al hecho de que se aceleran los modos de orden superior cuando se pasa a través del revestimiento en lugar de a través del núcleo, caso en el que estos modos de orden superior llegarán en un tiempo diferente que los modos de orden inferior. La presencia de tales múltiples pulsos se refleja en un ensanchamiento temporal de la respuesta resultante. Como resultado de este efecto de revestimiento, el ancho de banda se reduce de esta manera.

Para conseguir los rendimientos expuestos por la norma TIA-492AAAC-A, es necesario limitar el efecto de revestimiento en la fibra.

El documento WO-A-2006/010798 describe una fibra óptica multimodo que comprende un núcleo central de índice gradual y una trinchera deprimida ubicada en la periferia del núcleo central. El perfil de índice gradual del núcleo central se extiende hasta la parte inferior de la trinchera deprimida (núcleo de gradiente deprimido extendido) que es seguido por una depresión de índice de refracción constante. Este tipo de perfil de la técnica anterior se muestra en la Figura 10C (explicada a continuación). El núcleo de gradiente deprimido extendido se considera que es parte del núcleo y la depresión del índice de refracción constante se considera que es una trinchera deprimida. La extensión del núcleo de índice alfa bajo el revestimiento óptico exterior y hasta la parte inferior de la trinchera deprimida en forma del núcleo de gradiente deprimido extendido puede conducir a un aumento en el tamaño del núcleo, núcleo que a continuación se vuelve incompatible con las normas OM3 y OM4 anteriormente explicadas. La extensión del núcleo a los valores de índice de refracción negativos puede producir también pérdidas debido a la propagación de modos con fugas que son intrínsecos a la geometría de una trinchera deprimida.

El documento WO-A-2009/054715, de los presentes inventores, desvela una fibra óptica multimodo que comprende un núcleo central que tiene un perfil de índice gradual y un revestimiento deprimido situado en la periferia del núcleo central. El perfil de índice gradual del núcleo se extiende hasta la parte inferior de la trinchera deprimida seguido por una depresión de índice constante. Este tipo de perfil de la técnica anterior se muestra en la Figura 10C (explicada a continuación). La extensión del núcleo de índice alfa bajo el revestimiento óptico exterior y hasta la parte inferior de la trinchera deprimida puede conducir a un aumento en el tamaño del núcleo. Como resultado de esto, la fibra óptica se vuelve incompatible con las normas OM3 y OM4 anteriormente explicadas. La extensión del núcleo a los valores de índice de refracción negativos puede producir también pérdidas debido a la propagación de modos con fugas que son intrínsecos a la geometría de una trinchera deprimida.

El documento US-A-4.339.174 describe una fibra multimodo con un núcleo que tiene un perfil de índice gradual y un efecto de revestimiento reducido. Sin embargo, la fibra tiene un diámetro de 60,5 µm, y no está optimizada para aplicaciones de alto ancho de banda.

El documento US-A-4.184.744 desvela una fibra óptica multimodo que comprende un núcleo central que tiene un perfil de índice gradual y una trinchera deprimida (denominada capa intermedia) situada en la periferia del núcleo central. El espesor de la trinchera deprimida se encuentra entre 0,1 y 1 veces el radio del núcleo. Para un núcleo que tiene un radio **de 50 µm el espesor de la capa intermedia se encuentra entre 5 y 50 µm**.

Los documentos US-A-4.229.070 y US-A-4.230.396 describen fibras multimodo que tienen un núcleo de índice gradual rodeado por una trinchera deprimida para reducir el efecto de revestimiento. Sin embargo, las fibras descritas tienen un diámetro de 62,5 µm, y no son adecuadas para aplicaciones de alto ancho de banda.

El documento US20080166094 describe una fibra óptica multimodo resistente a la curvatura que comprende una región de núcleo de índice gradual y una región de revestimiento que rodea y es directamente adyacente a la región de núcleo, comprendiendo la región de revestimiento una porción anular de índice deprimido que tiene un índice de refracción relativo deprimido, con relación a otra porción del revestimiento. Esta configuración no permite reducir suficientemente el efecto del revestimiento.

El documento US-A1-5.115.486 describe una fibra multimodo para radiación de transmisión de láser con alta salida con conservación sustancial de la estructura de modo. La fibra tiene un perfil de índice de refracción gradual. La estructura de la fibra consiste en un núcleo con un revestimiento alrededor del núcleo y una funda protectora alrededor del revestimiento. El diámetro de núcleo se encuentra entre 200 y 800 µm y, por lo tanto, no es adecuado para aplicaciones de alto ancho de banda.

Por lo tanto, existe una necesidad de una fibra multimodo que tenga un perfil de índice de refracción que comprenda un núcleo de índice gradual, así como una trinchera deprimida, proporcionando dicha fibra un efecto de revestimiento reducido para permitir un alto ancho de banda para aplicaciones de alto ancho de banda.

Para este fin, la invención propone una fibra óptica multimodo de acuerdo con la reivindicación 1.

De acuerdo con una realización la fibra tiene un ancho de banda con un desplazamiento radial en 25 µm (Ancho de banda de Desplazamiento Radial-ROB25) que es superior a 2000 MHz.km.

De acuerdo con una realización, la fibra tiene un ancho de banda con un desplazamiento radial en 25 µm que es mayor que 4000 MHz.km.

De acuerdo con una realización, el perfil de índice alfa del núcleo central tiene un parámetro alfa que tiene un valor comprendido entre 1,9 y 2,1.

De acuerdo con una realización, la fibra tiene una apertura numérica (NA) que es igual a $0,200 \pm 0,015$.

De acuerdo con una realización, la diferencia de índice de refracción de la trinchera deprimida con respecto al revestimiento óptico exterior es constante a través de la anchura completa de la trinchera deprimida.

De acuerdo con una realización, la fibra tiene un ancho de banda de lanzamiento sobrelleñado (OFL) que es superior

a 1500 MHz.km.

De acuerdo con una realización, la fibra tiene un ancho de banda de lanzamiento sobrellenado (OFL) que es superior a 3500 MHz.km.

5 De acuerdo con una realización, la fibra tiene un ancho de banda modal efectivo (EMB) que es superior a 2000 MHz.km.

De acuerdo con una realización, la fibra tiene un ancho de banda modal efectivo (EMB) que es superior a 4000 MHz-km.

La invención también se refiere a un sistema óptico multimodo de acuerdo con la reivindicación 5.

10 De acuerdo con una realización, el sistema óptico multimodo tiene una tasa de datos que es superior o igual a 10 GbE (Gb/s) hasta 100 metros (m).

De acuerdo con una realización, el sistema óptico multimodo tiene una tasa de datos que es superior o igual a 10 GbE (Gb/s) hasta 300 metros (m).

Otras características y ventajas de la presente invención se harán evidentes al leer la siguiente descripción de las realizaciones de la invención, dadas a modo de ejemplo y con referencia a los dibujos adjuntos, que muestran:

15 La Figura 1, ya descrita, un diagrama que ilustra una medición de DMD;
La Figura 2, ya descrita, un gráfico de mediciones de DMD;

La Figura 3, un gráfico que representa la tendencia de un parámetro de Ancho de Banda de Desplazamiento Radial (ROB) en megahercios kilómetro como una función del desplazamiento radial en micrómetros;

20 La Figura 4, un diagrama que muestra un perfil de índice de refracción de una fibra no de acuerdo con la invención, mediante una representación del índice de refracción frente al radio de la fibra en micrómetros;

Las Figuras 5 a 7, gráficos que muestran mediciones de Ancho de banda de Desplazamiento Radial con un desplazamiento radial de 23 micrómetros (ROB23), 24 micrómetros (ROB24) y 25 micrómetros (ROB25) todos en megahercios kilómetro como una función de un parámetro del perfil de índice de refracción de la fibra, que es la profundidad de la trinchera deprimida;

25 La Figura 8, un gráfico que muestra los valores de un parámetro ROB25 en megahercios kilómetro en varias fibras de acuerdo con la técnica anterior y en varias fibras de acuerdo con la invención;

La Figura 9, dos gráficos tridimensionales (3D) que muestran las respuestas de las fibras de acuerdo con la técnica anterior y de acuerdo con la invención para una inyección de un pulso de luz con un desplazamiento radial de 25 μm (ROB25); las fibras de acuerdo con la técnica anterior se representan en el gráfico izquierdo y las fibras de acuerdo con la invención en el gráfico derecho.

30 La Figura 10, un diagrama que muestra tres perfiles de índice de refracción mediante una representación del índice de refracción frente al radio en la fibra. La Figura 10A muestra un perfil de índice de refracción de una fibra no de acuerdo con la invención. La Figura 10B muestra un perfil de índice de refracción de una fibra de acuerdo con la invención. La Figura 10C muestra un perfil de índice de refracción de una fibra de acuerdo con la técnica anterior.

35 La fibra de la invención es una fibra multimodo que comprende un núcleo central de radio r_1 con un perfil de índice alfa con respecto a un revestimiento óptico exterior que también comprende una trinchera deprimida situada en la periferia del núcleo central y que tiene una anchura w ; **y una diferencia de índice Δn_t** con respecto al revestimiento óptico exterior, de manera que se minimiza el efecto de revestimiento. La combinación de características de la presente invención garantiza un efecto de revestimiento reducido que hace posible conseguir un ancho de banda modal efectivo (EMB) mayor que 2000 MHz.km, e incluso mayor que 4700 Mhz.km. Esto se explica en más detalle a continuación.

40 Para caracterizar el efecto de revestimiento se determina un ROB (Ancho de banda de Desplazamiento Radial). Este ROB constituye un parámetro extraído de mediciones de DMD. Las mediciones de DMD se obtienen para condiciones de inyección de manera que la anchura espacial del pulso de entrada es $5 \mu\text{m} +/- 0,5 \mu\text{m}$ a 850 nm, y la distancia entre la fibra de sonda (fibra monomodo que da servicio para transmitir el pulso a la fibra multimodo) y la fibra multimodo es menor que $10 \mu\text{m}$. El ROB en un desplazamiento radial X, indicado ROBX, se calcula utilizando la información contenida en el ensanchamiento y la deformación del perfil temporal del pulso de salida obtenido para una inyección en el desplazamiento radial X, para una longitud de onda dada λ_0 (por ejemplo, 850 nm). Una función de transferencia $H^{(X)}$ de lo obtenido usando una transformada de Fourier y una desconvolución de pulso corresponde a cada desplazamiento radial.

45 50 "Se(f) es la transformada de Fourier del pulso de entrada medido de acuerdo con la norma TIA-455-220-A 5.1, Ss(f,X) es la transformada de Fourier del pulso de salida que corresponde al lanzamiento de desplazamiento X medido de acuerdo con la norma TIA-455-220-A 5.1, f es la frecuencia.
Para cada lanzamiento de desplazamiento X, una función de transferencia puede definirse de la siguiente manera:"

55 Sea $S_e(f)$ la transformada de Fourier del pulso de entrada medido de acuerdo con la norma TIA-455-220-A 5.1. $S_s(f, X)$ es la transformada de Fourier del pulso de salida que corresponde al lanzamiento de desplazamiento X medido de acuerdo con la norma TIA-455-220-A 5.1, f es la frecuencia.

Para cada lanzamiento de desplazamiento X, una función de transferencia puede definirse de la siguiente manera:

$$H^X(f) = \frac{S_s(f, X)}{S_e(f)}$$

ROBX es entonces el ancho de banda a -3 dB de la función de transferencia $H^X(f)$, que corresponde a la respuesta de la fibra para una inyección en un desplazamiento radial de X en las mediciones de DMD.

- 5 En la práctica, se calcula el ancho de banda para una atenuación de -1,5 dB y, a continuación, se extrapola para una atenuación de -3 dB, suponiendo una respuesta gaussiana, y multiplicando por un factor $\sqrt{2}$ (ya que este es el caso para el cálculo del ancho de banda efectivo):

$$10 \cdot \log_{10} (H^{(X)}(f_X)) = -1,5 \quad ROBX = \sqrt{2} \cdot f_X$$

- 10 El gráfico en la Figura 3 muestra el ROB como una función del desplazamiento radial medido a una longitud de onda de 850 nm. En el eje y el valor de ROB se representa contra el desplazamiento radial en micrómetros que se representa en el eje x. El ROB en la Figura 3 se representa para fibras con un perfil de índice alfa que tiene diferentes valores del parámetro alfa (alfa varía entre 2,04 y 2,08). Se observa que ROBX depende fuertemente del valor del **parámetro α para un desplazamiento radial** comprendido entre 0 y aproximadamente 18 μm . Lo que significa que, en la ventana del desplazamiento radial de cero a 18 micrómetros, las trazas para los diferentes valores alfa varían significativamente más allá de un desplazamiento radial de 18 μm (es decir más allá de ROB18), el valor de ROBX es menor que 2000 MHz.km. Después de ROB18, el ROBX entonces ya no es muy sensible más al **parámetro α (es decir, las trazas para los diferentes valores alfa no varían significativamente)**, y el ROBX depende esencialmente de la interfaz de núcleo-revestimiento. El radio del núcleo central de estas fibras es de 25 micrómetros y aproximadamente en los 7 micrómetros exteriores (es decir, entre ROB18 y ROB25) la influencia del perfil alfa se ve reducida de manera intensa y toma el mando la influencia de la trinchera deprimida y el revestimiento.

- 25 Una fibra no de acuerdo con la invención tiene un perfil de índice de refracción, como se ilustra en la Figura 4, y esquemáticamente en la Figura 10A, que hace posible obtener un ROB25 que es superior a 2000 MHz.km e incluso superior a 4000 MHz.km. La fibra de acuerdo con la invención comprende un núcleo óptico y un revestimiento óptico exterior, comprendiendo el núcleo óptico en el centro un núcleo central que tiene un perfil de índice gradual o índice alfa. Este núcleo central tiene un índice de refracción máximo en el centro del núcleo central (donde r_1 es cero) índice de refracción que se reduce continuamente pasando desde el centro de la fibra óptica (donde r_1 es cero) a la periferia del núcleo central, donde la diferencia de índice de refracción con respecto al revestimiento óptico exterior se encuentra en un punto más inferior, que es cero en el caso de la fibra no de acuerdo con la invención mostrada en las Figuras 4 y 10A. Rodeando el núcleo central se encuentra una trinchera deprimida. Por trinchera deprimida en la descripción y en las reivindicaciones de esta solicitud se entiende la porción radial de la fibra que tiene un índice de refracción que es menor que el índice de refracción del revestimiento óptico exterior n_g , es decir, que tiene un índice de refracción negativo. La trinchera deprimida empieza en una disminución vertical sustancialmente en el índice de refracción.

- 30 35 En la fibra (mostrada en la Figura 10B) de la presente invención, el perfil de índice alfa del núcleo central comprende una porción que tiene un valor de índice de refracción negativo, es decir, el núcleo central de índice gradual se "extiende" hacia la trinchera deprimida. La trinchera deprimida empieza en una disminución sustancialmente vertical en el índice de refracción y la porción del perfil de índice de refracción que tiene un índice de refracción negativo se considera que es parte del núcleo central de índice gradual y no de la trinchera deprimida.

- 40 Rodeando la trinchera deprimida se encuentra el revestimiento óptico exterior. En una realización de la presente invención, el núcleo central está rodeado directamente por la trinchera deprimida; y la trinchera deprimida está rodeada directamente por el revestimiento óptico exterior.

- 45 La Figura 10C muestra una realización de la técnica anterior, por ejemplo, según se desvela en los documentos WO-A-2006/010798 y WO-A-2009/054715. Este perfil de índice gradual de la técnica anterior del núcleo se extiende hasta la parte inferior de la trinchera deprimida seguido por una depresión de índice constante.

- 50 Debería observarse que, en una realización, la trinchera deprimida tiene un valor de índice de refracción negativo constante a través de la anchura completa w_t . Sin embargo, también es posible que la trinchera deprimida consista en dos o más subtrincheras deprimidas que cada una tiene una constante independiente, valor de índice de refracción negativo. Esta realización no se muestra en los dibujos.

- 55 Típicamente, la trinchera deprimida de acuerdo con la presente invención tiene una **profundidad Δn_t** , es decir, una diferencia de índice de refracción negativa con respecto al revestimiento óptico exterior. Esta **profundidad Δn_t** está comprendida entre -4×10^{-3} y -1×10^{-3} . El significado de este intervalo de valores se entenderá mejor haciendo referencia a las Figuras 5, 6 y 7. Las Figuras 5, 6, y 7 respectivamente muestran mediciones del ancho de banda de desplazamiento radial en desplazamientos radiales de 23 micrómetros (ROB23), 24 micrómetros (ROB24) y 25 micrómetros (ROB25). En el eje y se muestra el ROB en megahercios kilómetro y en el eje x- **se muestra la profundidad Δn_t** de la trinchera deprimida. La Figura 5 muestra los valores de ROB23, la Figura 6 muestra los valores de ROB24 y la Figura 7 muestra los valores de ROB25.

Estos valores de ROB se obtienen en una fibra para la que se han variado varios parámetros. Se ha variado la anchura w_t y la profundidad Δn_t de la trinchera deprimida, respectivamente entre $0,4 \mu\text{m}$ y $2 \mu\text{m}$, y entre -8×10^{-3} y $-0,5 \times 10^{-3}$. Además, se ha variado la diferencia de índice de refracción entre el final del perfil de índice alfa del núcleo central y el revestimiento óptico exterior entre $-0,5 \times 10^{-3}$ y 0. En el caso de la fibra mostrada en la Figura 10A, esta diferencia de índice de refracción es cero, y en el caso de la fibra mostrada en la Figura 10B, esta diferencia de índice de refracción se encuentra por debajo de cero. Además, la apertura numérica se ha variado entre 0,2 y 0,22.

Se ha hallado que la profundidad Δn_t de la trinchera deprimida es el parámetro principal que influencia los valores de ROB23, ROB24 y ROB25. Los valores óptimos para la profundidad Δn_t que hacen posible obtener los valores ROB23, ROB24 y ROB25 que son superiores a 2000 MHz.km, cumpliendo con el valor de los parámetros expuestos por la norma ITU-T G.651.1. Por lo tanto, el intervalo de valores para la profundidad Δn_t de la trinchera deprimida (es decir, de 0,5 a 2 micrómetros) de acuerdo con la presente invención garantiza que el efecto de revestimiento está bien compensado por la trinchera deprimida de la fibra inventiva.

La trinchera deprimida tiene una anchura w_t comprendida entre $0,5 \mu\text{m}$ y $2 \mu\text{m}$. La anchura w_t está limitada a un valor de como máximo $2 \mu\text{m}$ para mantener una apertura numérica de la fibra que se encuentra en la norma ITU-T G.651.1.

El núcleo central de la fibra tiene un radio r_1 de **25 μm (es decir, un diámetro de 50 μm)**. El perfil de índice gradual del núcleo central tiene un valor para el coeficiente alfa que es **típico de una fibra multimodo: α está comprendida, por ejemplo, entre 1,9 y 2,1**. La diferencia de índice de refracción del núcleo central con respecto al revestimiento óptico exterior tiene un **valor máximo Δn_1** (en el centro del núcleo central) que está comprendido entre 11×10^{-3} y 16×10^{-3} .

La diferencia de índice de refracción entre el final del perfil de índice gradual del núcleo central y el revestimiento óptico exterior está comprendida entre $-0,5 \times 10^{-3}$ y 0. Si la diferencia de índice de refracción entre el final del perfil de índice gradual del núcleo central y el revestimiento óptico exterior es cero, el perfil de índice gradual del núcleo central no se extiende más allá del nivel de índice del revestimiento óptico exterior; esto no está de acuerdo con la invención.

En la invención, la diferencia de índice de refracción entre el final del perfil de índice gradual del núcleo central y el revestimiento óptico exterior es negativa, por lo tanto, el perfil de índice gradual del núcleo central se extiende más allá del nivel de índice de refracción del revestimiento óptico exterior. Sin embargo, la extensión del perfil de índice gradual del núcleo central no alcanza la parte inferior de la trinchera deprimida según se desvela en la Figura 10C para las fibras de la técnica anterior. Por lo tanto, las pérdidas debido a la propagación de modos de fuga intrínsecos están limitadas.

El revestimiento óptico exterior está fabricado típicamente de sílice natural por razones de coste, pero también puede estar fabricado de sílice dopado.

Las ventajas de la invención se harán más evidentes comparando fibras de acuerdo con la técnica anterior con fibras de acuerdo con la invención. Se han fabricado las fibras de la técnica anterior y las fibras de acuerdo con la invención que tienen los mismos parámetros ópticos excepto para la trinchera deprimida. Se muestran los respectivos parámetros de la trinchera deprimida en la siguiente tabla:

	Profundidad $\Delta n_t \times 10^3$	Anchura $w_t (\mu\text{m})$
Técnica anterior	-0,8	8
Invención	-3	8

La Figura 8 muestra valores para el ancho de banda de desplazamiento radial en un desplazamiento radial de 25 micrómetros (ROB25) que se obtienen en las fibras de acuerdo con la técnica anterior y en las fibras de acuerdo con la invención, según se desvela en la tabla anterior. Se observa que, la mayoría de las fibras de acuerdo con la invención tienen un valor ROB25 que es superior a 2000 MHz.km, aproximadamente 10.000 MHz.km, mientras que las fibras de acuerdo con la técnica anterior tienen un valor de ROB25 de aproximadamente 1000 MHz.km. Las fibras de acuerdo con la invención, por lo tanto, tienen un ROB25 al menos el doble de alto que el de las fibras de la técnica anterior, lo que es deseable con respecto a la reducción requerida del efecto de revestimiento anteriormente mencionado.

La Figura 9 muestra la respuesta de las fibras anteriormente descritas en la tabla de acuerdo con la técnica anterior y de acuerdo con la presente invención para una inyección de un pulso de luz en el desplazamiento radial de 25 μm . Las respuestas de las fibras de acuerdo con la técnica anterior y de acuerdo con la invención se muestran respectivamente en los gráficos en el lado izquierdo y el lado derecho en la Figura 9. Cada gráfico muestra, en el eje x, la escala de tiempo, en el eje y, los números de cada una de las fibras, y en el lateral, la amplitud normalizada de la señal de salida. La gran mayoría de las respuestas de las fibras de acuerdo con la técnica anterior muestran múltiples pulsos, mientras que la mayoría de las respuestas de las fibras de acuerdo con la invención muestran un único pulso. A partir de esto, puede concluirse que se reduce el efecto de revestimiento en las fibras de acuerdo con la presente invención, en comparación con las fibras de acuerdo con la técnica anterior.

Observando la Figura 9 en comparación con la Figura 8, se deduce que las fibras de acuerdo con la invención que

tienen un valor de ROB25 que es superior a 2000 MHz.km, o incluso superior a 4000 MHZ.km, y muestran una respuesta para un desplazamiento radial de 25 μm , en forma de un único pulso (fibras inventivas) en lugar de múltiples pulsos (técnica anterior). Como resultado, las fibras de acuerdo con la invención tienen un efecto de revestimiento similar, que permite un ancho de banda amplio para aplicaciones de alto ancho de banda y, por lo tanto, se ha alcanzado uno de los objetivos de la presente invención.

5 La fibra de acuerdo con la presente invención es compatible con la norma ITU-T G.651.1. Tiene un diámetro de núcleo central de 50 μm y una apertura numérica de $0,2 \pm 0,015$. Se observa que, el núcleo central de índice gradual no continúa en la trinchera deprimida. Esto garantiza que se mantiene la apertura numérica establecida por la norma y se atenúe el efecto de revestimiento.

10 De acuerdo con una realización, la fibra de acuerdo con la invención cumple con la norma OM3, en concreto un ancho de banda modal efectivo EMB mayor que 2000 MHz.km con una dispersión modal menor que 0,3 ps/m, y un ancho de banda de OFL mayor que 1500 MHz.km. De acuerdo con otra realización, la fibra de acuerdo con la invención cumple con la norma OM4, en concreto un ancho de banda modal efectivo EMB mayor que 4700 MHz.km con una dispersión modal menor que 0,14 ps/m, y un ancho de banda mayor que OFL 3500 Mhz.km.

15 Las fibras ópticas pueden fabricarse extrayéndolas de preformas finales de una manera conocida de por sí.

Puede fabricarse una preforma final proporcionando una preforma primaria fabricada de una manera conocida de por sí con una capa de recubrimiento exterior (es decir, el denominado proceso de recubrimiento). Esta capa de recubrimiento exterior consiste en vidrio de sílice natural o sintético dopado o no dopado. Están disponibles varios métodos para proporcionar la capa de recubrimiento exterior.

20 En un primer método, por ejemplo, la capa de recubrimiento exterior puede proporcionarse depositando y vitrificando partículas de sílice natural o sintética en la periferia exterior de la preforma primaria bajo la influencia de calor. Un proceso de este tipo es conocido, por ejemplo, a partir de los documentos US 5.522.007, US 5.194.714, US 6.269.663 y US 6.202.447.

25 En otro ejemplo de un método, puede recubrirse una preforma primaria usando un tubo de manguito de sílice que puede estar o no dopado. Este tubo de manguito puede a continuación colapsarse en la preforma primaria.

En un método alternativo adicional más, puede aplicarse una capa de recubrimiento por medio de un método OVD (Deposición de Vapor Exterior) en el que, en primer lugar, se deposita una capa hollín en la periferia exterior de una preforma primaria después de lo que dicha capa de hollín se vitrifica para formar vidrio.

30 Las preformas primarias pueden fabricarse usando técnicas conocidas que comprenden, pero sin limitación, técnicas de deposición de vapor exterior, tales como OVD y VAD (Deposición Axial de Vapor) y técnicas de deposición interior, tales como MCVD (Deposición de Vapor Químico Modificada), FCVD (Deposición de Vapor Químico en Horno) y PCVD (Deposición de Vapor Químico de Plasma), en donde las capas de vidrio se depositan en la superficie interna de un tubo de sustrato, que es de vidrio de sílice dopado o no dopado.

35 En una realización preferida, las preformas primarias se fabrican con el proceso de PCVD ya que este proceso permite que se controle de manera muy precisa la forma del perfil de índice de refracción de gradiente del núcleo central.

La trinchera deprimida puede depositarse en la superficie interna de un tubo de sustrato como parte del proceso de deposición de vapor químico. Sin embargo, en una realización preferida, la trinchera deprimida se fabrica usando un tubo de sustrato dopado con flúor como el punto de inicio del proceso de deposición interno para la deposición del núcleo de índice de refracción de gradiente central o la trinchera deprimida se fabrica cubriendo el núcleo central de índice de refracción de gradiente producido usando un proceso de deposición exterior con un tubo de sílice dopado con flúor.

En una realización adicional más, se fabrica una preforma primaria con un proceso de deposición interno en el que se usa un tubo de sustrato dopado con flúor, contenido el tubo resultante las capas depositadas puede que puedan cubrirse por uno o más tubos de sílice dopados con flúor adicionales para aumentar el espesor de la trinchera deprimida, o para crear una trinchera deprimida que tiene un índice de refracción variable a través de la anchura de la misma. Aunque no se requiere, el uno o más tubos de manguito adicionales están preferentemente comprimidos en la preforma primaria antes de que se lleve a cabo un recubrimiento adicional. Este proceso de cubrición y colapso a menudo se denomina como encamisado y puede repetirse si así se requiere para crear varias capas de vidrio en el exterior de la preforma primaria.

50 La presente invención no está limitada a las realizaciones descritas a modo de ejemplo. La fibra de acuerdo con la invención puede instalarse en numerosos sistemas de transmisión que tiene buena compatibilidad con las otras fibras del sistema. La fibra óptica multimodo de acuerdo con la invención puede usarse, por ejemplo, en un sistema óptico Ethernet con un ancho de banda mejorado.

REIVINDICACIONES

1. Una fibra óptica multimodo que comprende un núcleo óptico rodeado por un revestimiento óptico exterior, comprendiendo el núcleo óptico desde el centro a la periferia:

- 5 - un núcleo central que tiene un radio (r_1) y un perfil de índice alfa con respecto al revestimiento óptico exterior;
 - una trinchera deprimida situada en la periferia del núcleo central que tiene una anchura (w_t) y **una diferencia de índice de refracción (Δn_t)** con respecto al revestimiento óptico exterior;

en la cual

- el diámetro del núcleo central, que es 2 veces r_1 , tiene un valor de $50 \pm 3 \mu\text{m}$;
 - la anchura (w_t) de la trinchera deprimida está comprendida entre 0,5 micrómetros (μm) y 2 micrómetros (μm);
 10 - **la diferencia de índice de refracción (Δn_t)** de la trinchera deprimida con respecto al revestimiento óptico exterior está comprendida entre -4×10^{-3} y -1×10^{-3} ;

en la que el núcleo central tiene un valor máximo de la diferencia de índice de refracción (Δn_1) con respecto al revestimiento óptico exterior que está comprendido entre 11×10^{-3} y 16×10^{-3} ,
caracterizada porque:

- 15 - el perfil de índice alfa del núcleo central comprende una porción que tiene un valor de índice de refracción negativo, en la que el núcleo central de índice gradual se extiende en la trinchera deprimida y la extensión del perfil de índice gradual del núcleo central no alcanza la parte inferior de la trinchera deprimida;
 - la diferencia de índice de refracción entre el final del perfil de índice alfa del núcleo central y el revestimiento óptico exterior está comprendida entre $-0,5 \times 10^{-3}$ y 0.

20 2. La fibra de acuerdo con la reivindicación 1, en la que el perfil de índice alfa del núcleo central tiene un parámetro alfa (α) que tiene un valor comprendido entre 1,9 y 2,1.

3. La fibra de acuerdo con una de las reivindicaciones precedentes, que tiene una apertura numérica (NA) que es igual a $0,200 \pm 0,015$.

25 4. La fibra de acuerdo con una de las reivindicaciones precedentes, en la que la **diferencia de índice de refracción (Δn_t)** de la trinchera deprimida con respecto al revestimiento óptico exterior es constante a través de la anchura completa (w_t) de la trinchera deprimida.

5. Un sistema óptico multimodo que comprende al menos una porción de fibra óptica multimodo de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4.

Figura 1

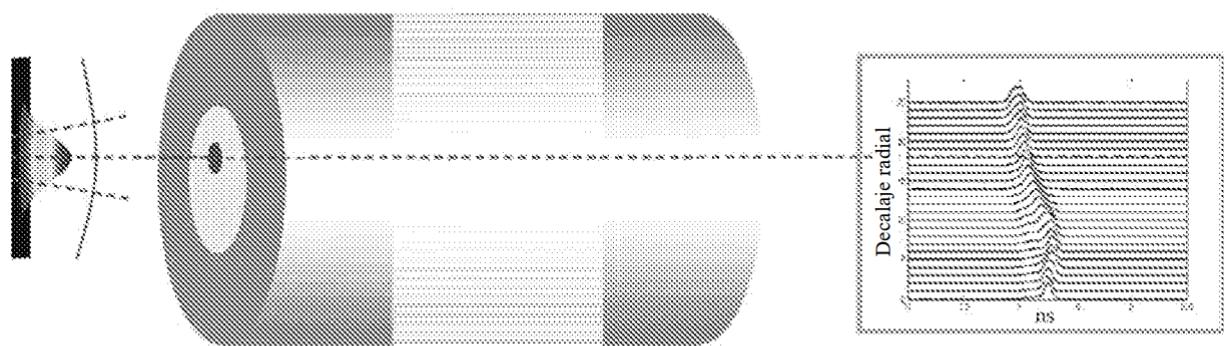


Figura 2

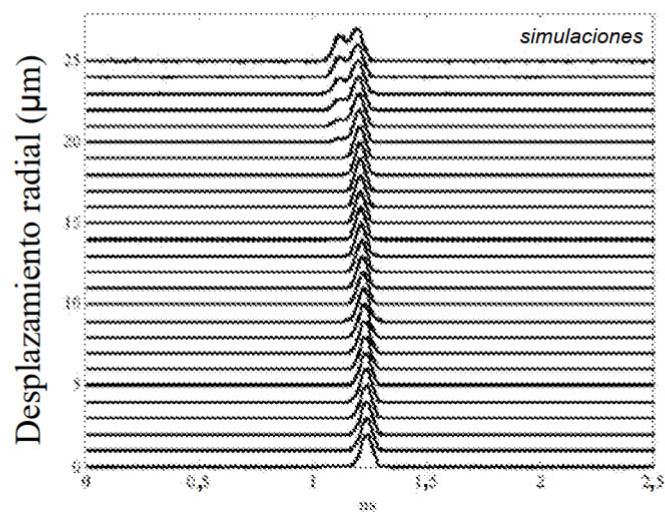


Figura 3

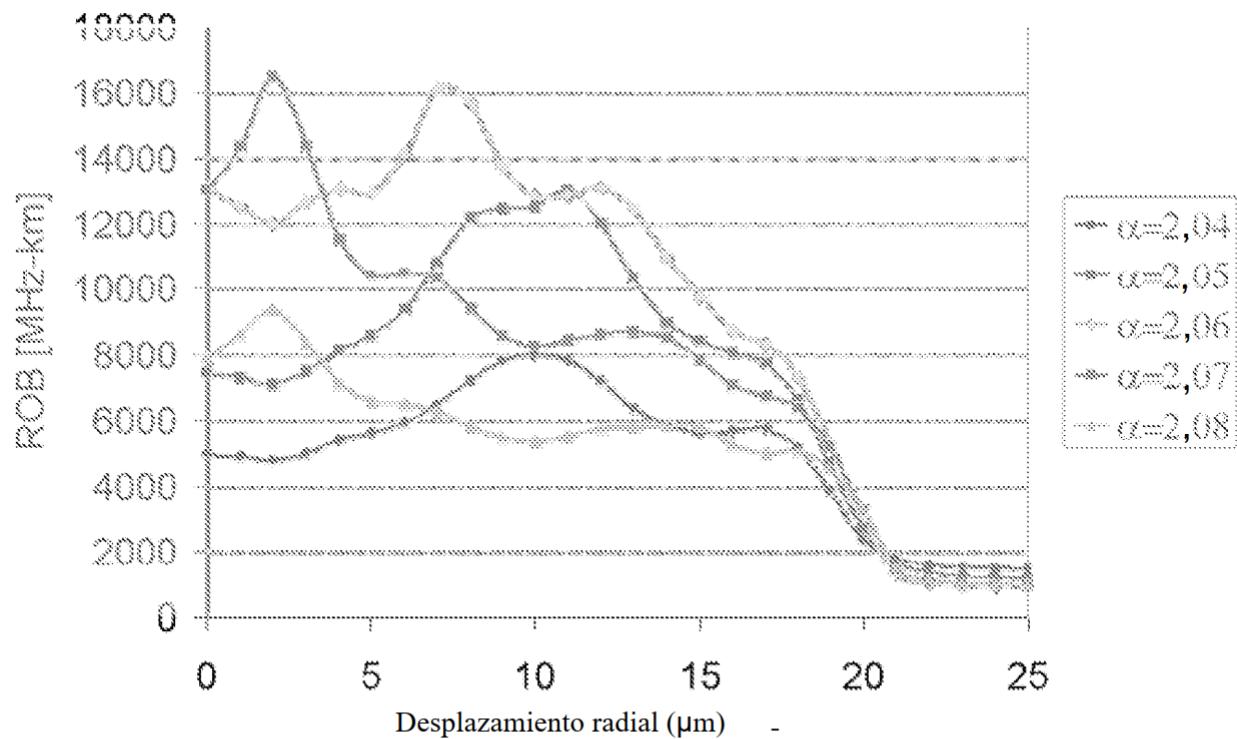


Figura 4

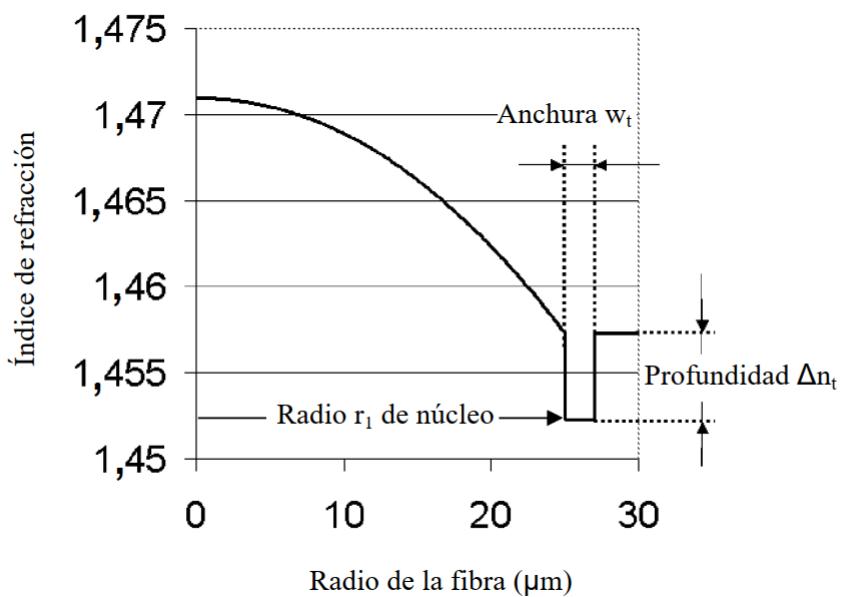


Figura 5

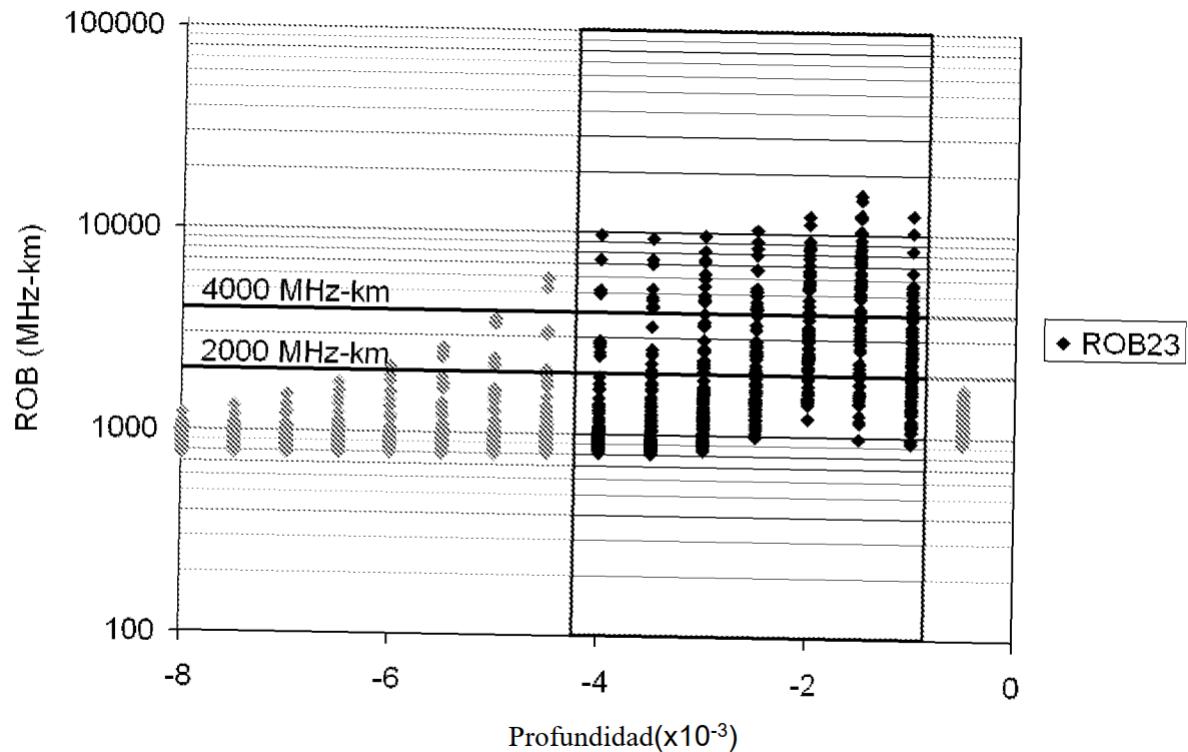


Figura 6

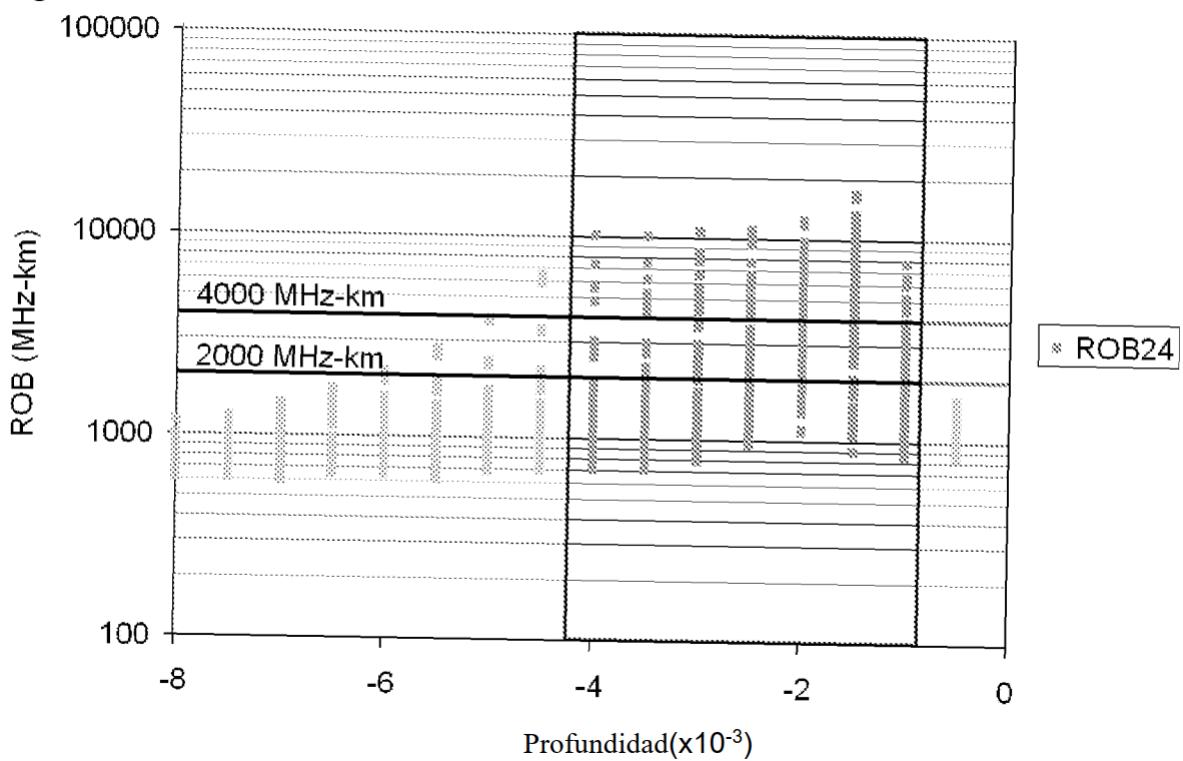


Figura 7

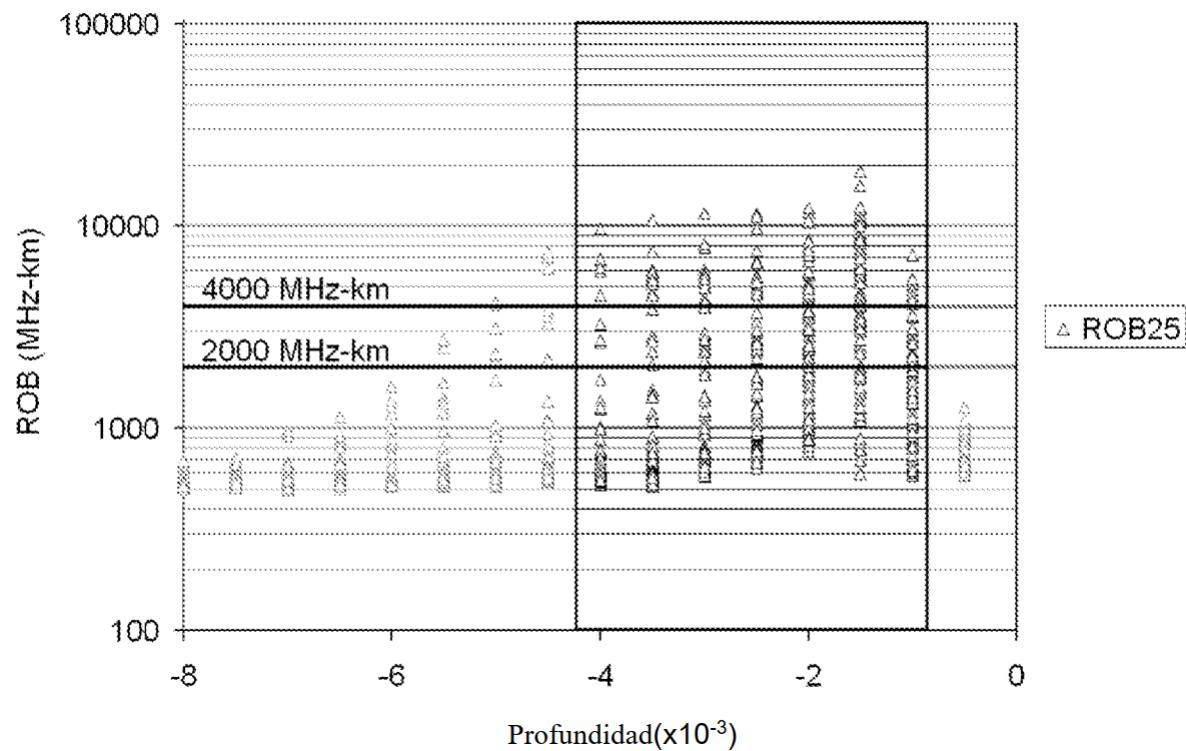


Figura 8

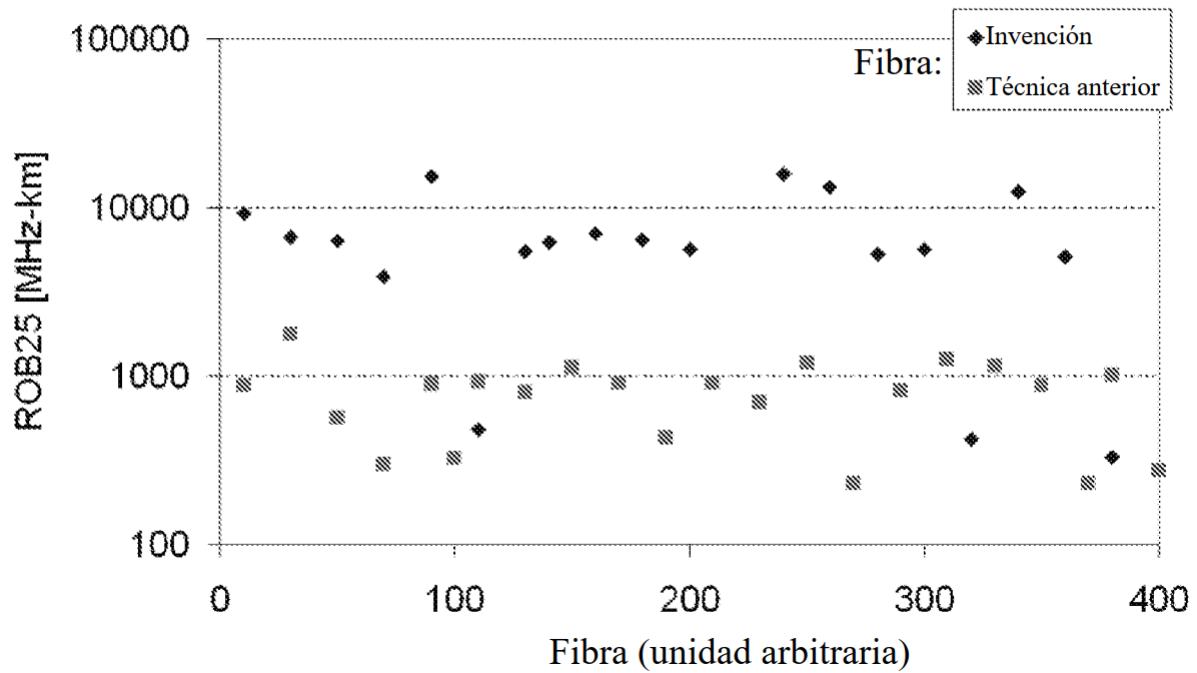
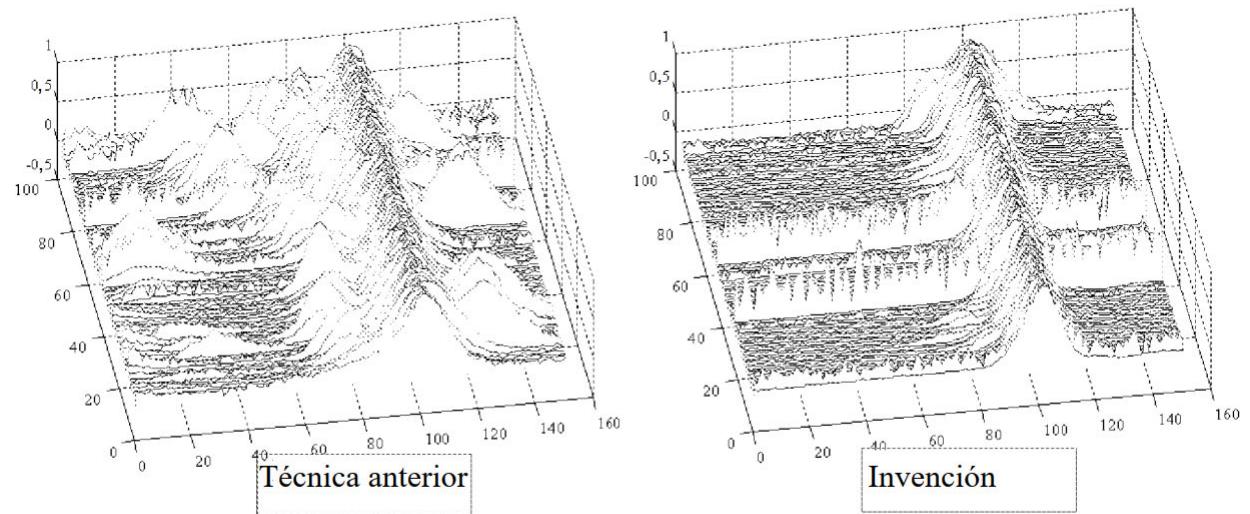


Figura 9



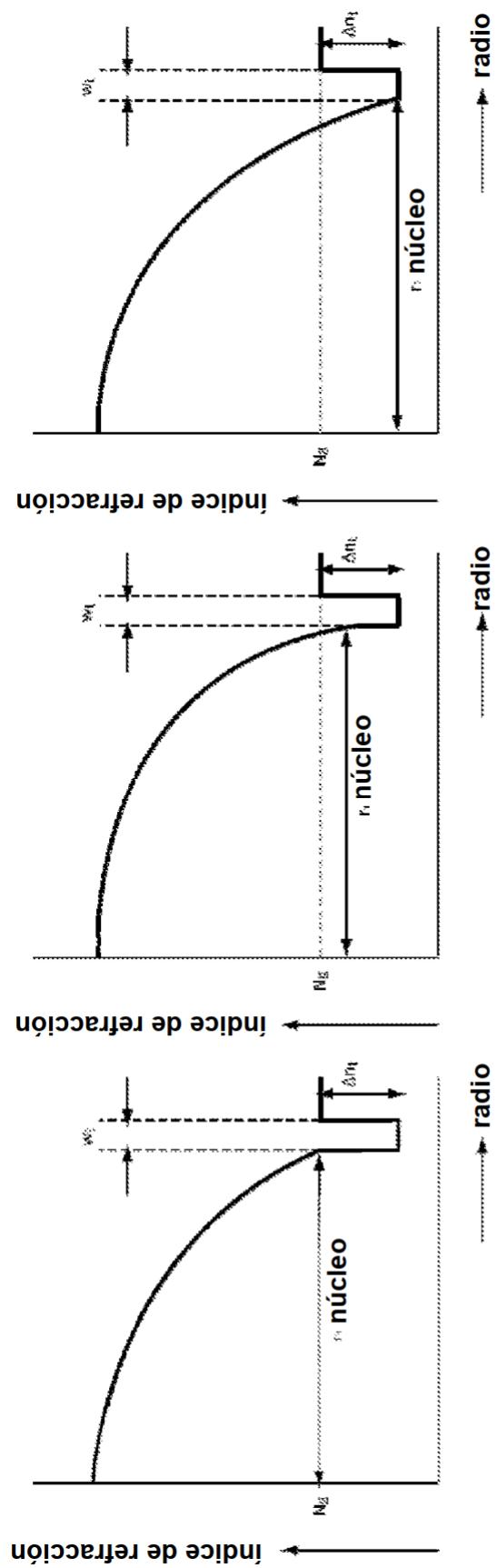


FIG 10 A
1^a realización

FIG 10 B
2^a realización

FIG 10 C
Técnica anterior

REFERENCIAS CITADAS EN LA DESCRIPCIÓN

La lista de referencias citada por el solicitante lo es solamente para utilidad del lector, no formando parte de los documentos de patente europeos. Aún cuando las referencias han sido cuidadosamente recopiladas, no pueden excluirse errores u omisiones y la OEP rechaza toda responsabilidad a este respecto.

Documentos de patente citado en la descripción

- WO 2006010798 A [0014] [0046]
- WO 2009054715 A [0015] [0046]
- US 4339174 A [0016]
- US 4184744 A [0017]
- US 4229070 A [0018]
- US 4230396 A [0018]
- US 20080166094 A [0019]
- US 5115486 A1 [0020]
- US 5522007 A [0064]
- US 5194714 A [0064]
- US 6269663 B [0064]
- US 6202447 B [0064]

Bibliografía no de patentes citada en la descripción

- *TIA SCFO-6.6 version*, 22 November 2002 [0007]
- **D. GLOGE et al.** Multimode theory of graded-core fibres. *Bell system Technical Journal*, 1973, 1563-1578 [0009]
- **G. YABRE**. Comprehensive theory of dispersion in graded-index optical fibers. *Journal of Lightwave Technology*, February 2000, vol. 18 (2), 166-177 [0009]