

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 665 784**

51 Int. Cl.:

G02B 6/036 (2006.01)

G02B 6/028 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **28.02.2014 PCT/IB2014/000503**

87 Fecha y número de publicación internacional: **03.09.2015 WO15128691**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.02.2014 E 14728271 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.02.2018 EP 3111260**

54 Título: **Fibra óptica multimodo con alto ancho de banda en una gama de longitud de onda ampliada, y el sistema óptico multimodo correspondiente**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
27.04.2018

73 Titular/es:

**DRAKA COMTEQ BV (100.0%)
De Boelelaan 7
1083 HJ Amsterdam, NL**

72 Inventor/es:

**BIGOT, MARIANNE;
MOLIN, DENIS y
SILLARD, PIERRE**

74 Agente/Representante:

ARPE FERNÁNDEZ, Manuel

ES 2 665 784 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 con alto ancho de banda en una gama de longitud de onda ampliada, y el sistema óptico multimodo correspondiente

5 1. Campo de la invención

10 **[0001]** La presente invención se refiere al campo de las transmisiones por fibra óptica, y más específicamente, a las fibras multimodo utilizadas en sistemas de relativo largo alcance y de alta tasa binaria. Más específicamente, la invención se refiere a fibras ópticas multimodo diseñadas para cumplir los requisitos de alta tasa binaria de sistemas 400 GbE de la próxima generación.

2. Antecedentes

15 **[0002]** Las fibras multimodo se usan con éxito en redes de datos de alta velocidad junto con fuentes de alta velocidad que típicamente usan láseres emisores de superficie de cavidad vertical multimodo transversalmente, más simplemente llamados VCSEL. Las fibras multimodo que funcionan a 850 nm y 1300 nm son bien conocidas.

20 **[0003]** Las fibras multimodo se ven afectadas por la dispersión intermodal, que resulta del hecho de que, en una fibra multimodo, para una longitud de onda particular, varios modos ópticos se propagan simultáneamente a lo largo de la fibra, llevando la misma información, pero viajando con diferentes velocidades de propagación. La dispersión modal se expresa en términos de Retardo de Modo Diferencial (DMD), que es una medida de la diferencia en el retardo de impulso (ps/m) entre los modos más rápidos y más lentos que atraviesan la fibra.

25 **[0004]** Para minimizar la dispersión modal, las fibras ópticas multimodo utilizadas en las comunicaciones de datos comprenden generalmente un núcleo, generalmente dopado con germanio, y que muestra un índice de refracción que disminuye progresivamente desde el centro de la fibra hasta su unión con un revestimiento. En general, el perfil de índice viene dado por una relación conocida como "perfil α ", de la siguiente manera:

$$n(r) = n_0 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha} \text{ for } r \leq a,$$

donde

30 n_0 es el índice de refracción en un eje óptico de la fibra;
 r es la distancia desde dicho eje óptico;
 a es un radio del núcleo de dicha fibra;
 Δ es un parámetro adimensional, indicativo de una diferencia de índice entre el núcleo y un revestimiento de la fibra;
 y

35 α es un parámetro adimensional, indicativo de una forma del perfil de índice.

[0005] Cuando una señal luminosa se propaga en un núcleo de este tipo que tiene un índice gradual, los diferentes modos experimentan un medio de propagación diferente, que afecta su velocidad de propagación de manera diferente. Ajustando el valor del parámetro α , es posible obtener teóricamente una velocidad de grupo, que es virtualmente igual para todos los modos y, por lo tanto, una dispersión intermodal reducida para una longitud de onda particular. Sin embargo, un valor óptimo del parámetro α es válido solo para una longitud de onda particular.

40 **[0006]** El perfil de índice gradual en alfa y la interfaz de revestimiento-núcleo de las fibras multimodo están optimizados para funcionar con VCSEL de GaAs que pueden modularse directamente en corriente para soportar sistemas de 10 Gbps y 25 Gbps a 850 nm. La compatibilidad con versiones anteriores para su uso a 1300 nm con fuentes LED también está garantizada para la mayoría de las fibras multimodo de 50 μm y 62,5 μm actualmente en uso. Los rendimientos de dichas fibras multimodo de 50 μm de alto ancho de banda, optimizadas para láser, también denominadas fibras OM4, han sido estandarizadas por la Organización Internacional de Normalización en el documento ISO/IEC 11801, así como en el estándar TIA/EIA 492AAAD.

45 **[0007]** Sin embargo, la explosión de la demanda de ancho de banda en redes empresariales está impulsando una necesidad urgente de mayores velocidades de red Ethernet. Para aumentar aún más la tasa binaria de datos para los sistemas 400 GbE de próxima generación, el uso de VCSELs (vertical-cavity surface-emitting lasers [láseres emisores de superficie de cavidad vertical]) de GaAs que operan de 40 a 56 Gb/s entre 850 nm y 1.200nm, combinado con multiplexado por división de longitud de onda aparece como una solución prometedora, ya que permitirá alcanzar mayor velocidad y mayor fiabilidad. En tal configuración, los rendimientos de OM4 son necesarios en un ancho de banda de transmisión ampliado, en comparación con los MMF OM4 listos para usar, optimizados a 850 nm.

55 **[0008]** Como el valor óptimo de alfa depende de la longitud de onda, el ancho de banda de transmisión generalmente se vuelve significativamente pequeño para otras longitudes de onda diferentes a la longitud de onda óptima. El experto en la técnica sabe bien que es posible utilizar dopantes tales como fósforo (P) o flúor (F) para modificar el índice de refracción de la sílice SiO₂, y así permitir reducir la dependencia de la longitud de onda del alfa óptimo.

60 **[0009]** El documento de patente de EE. UU. 7.421.172 a nombre de Draka Comteq B.V., revela fibras ópticas multimodo, cuyos núcleos de índice gradual se construyen usando GeO₂ y F como dopantes de la SiO₂. Variando la concentración de dopantes sobre el radio del núcleo, las características de dispersión inter-modo de las fibras

ópticas multimodo, se pueden adaptar de tal manera que el ancho de banda sea menos dependiente de la longitud de onda.

[0010] Aunque un co-dopado tal de fibras multimodo de índice gradual permite alcanzar un ancho de banda mayor en un rango de longitud de onda más amplio que las fibras multimodo previamente conocidas, dicho ancho de banda no es suficientemente alto para satisfacer la demanda de alta tasa binaria para sistemas de próxima generación.

[0011] El documento US 8.391.661 a nombre de Draka Comteq B.V., revela una fibra multimodo con mayor ancho de banda modal y mayor apertura numérica que las fibras multimodo de la técnica anterior. Con este fin, dicha fibra óptica multimodo, incluye un núcleo central que sigue una ecuación de ley de potencia modificada con un exponente alfa (por ejemplo, un parámetro alfa) que depende de la posición radial dentro de la fibra óptica. El parámetro alfa tiene, al menos, dos valores diferentes a lo largo del radio del núcleo central. Un primer valor de parámetro alfa α_1 controla la forma del núcleo de índice gradual en una zona interna del núcleo central, y un segundo valor de parámetro alfa α_2 , controla la forma del núcleo de índice gradual en una zona exterior del núcleo central. El segundo valor del parámetro alfa es típicamente menor que el primer valor del parámetro alfa. El perfil de núcleo de índice gradual y su primera derivada son típicamente sustancialmente continuos sobre el ancho del núcleo de índice gradual. El perfil de índice gradual del núcleo central tiene un valor delta Δ de un 1,9 por ciento o más.

[0012] En este documento US 8.391.661, el uso del perfil de índice gradual con dos o más valores alfa tiene como objetivo diseñar fibras ópticas multimodo que tengan una gran apertura numérica NA. Sin embargo, tales fibras ópticas multimodo de elevada NA tienen anchos de banda, que están optimizados para una sola longitud de onda (típicamente 850 nm). No permiten alcanzar el rendimiento de OM4 en un ancho de banda de transmisión ampliado.

[0013] El documento US 7.315.677 describe fibras ópticas multimodo que comprenden germanio (GeO_2) y flúor co-dopados en el núcleo de la fibra. Los perfiles de concentración de dopante están definidos por un par de parámetros alfa, α_1 y α_2 . La ventana operativa o la ventana de ancho de banda se amplía y la atenuación o pérdida es baja. En algunas realizaciones, están disponibles dos ventanas operativas para la transmisión.

[0014] El documento US 7.315.677, enseña por tanto "perfiles doble alfa" basados en co-dopado, donde cada perfil dopante es la suma de dos perfiles alfa con los mismos α_1 y α_2 utilizados para ambos compuestos. La definición alfa es diferente de la definición de perfil alfa comúnmente utilizada. Tales perfiles son difíciles de producir desde el punto de vista del proceso. Actualmente, la forma de concentración de Ge y F es difícil de controlar.

[0015] El documento JP 2005 107514 da a conocer una fibra multimodo del tipo de índice gradual. La parte central del núcleo está dopada con germanio o fósforo, mientras que la parte periférica externa del núcleo está dopada con flúor. El documento US 2013/114935 divulga una fibra óptica multimodo de índice gradual que comprende un núcleo de sílice dopado con germanio y al menos un co-dopante, que comprende uno de entre P_2O_5 o F o B_2O_3 , teniendo el núcleo un alfa dual.

[0016] En la bibliografía y en las patentes más generalmente, se han propuesto algunas soluciones consistentes en la utilización de un concepto de dopado con flúor total o bajo germanio. Algunas de estas soluciones también enseñan perfiles alfa doble, donde cada perfil de dopado usa su propio alfa. Pero tales soluciones requieren tener un revestimiento exterior con un índice de refracción mucho más bajo que el índice de refracción de la SiO_2 . Por lo tanto, para procesos de deposición tales como MCVD (por "deposición química en fase de vapor modificada") y PCVD (por "deposición de química en fase de vapor asistida por plasma"), que requieren depositar las diferentes capas dopadas dentro de un tubo de sustrato, tales soluciones son bastante complejas. Es necesario administrar las pérdidas de fuga y/o agregar un revestimiento exterior deprimido. Además, con un revestimiento externo dopado con flúor, resulta difícil considerar conceptos de "asistencia por zanja" que requieren aún más dopado con F del revestimiento. Requeriría niveles de concentración F que no se pueden alcanzar con los procesos de deposición existentes.

[0017] Por lo tanto, sería deseable diseñar una fibra óptica multimodo adaptada a aplicaciones de banda ancha y que muestre mejoras con respecto a la técnica anterior.

[0018] Más precisamente, sería deseable diseñar una fibra óptica multimodo, que muestre el rendimiento OM4 aumentado a múltiples longitudes de onda o a una ventana operativa de longitud de onda mayor de 150 nm.

[0019] También sería deseable diseñar una fibra óptica multimodo de este tipo, que sea fácil de fabricar, especialmente mediante la utilización de procesos de deposición tales como MCVD y PCVD.

3. Sumario

[0020] En una realización particular de la invención, se propone una fibra óptica multimodo, que comprende: un núcleo central rodeado por un revestimiento óptico exterior, teniendo dicho núcleo central (i) un radio exterior a, (ii) un radio de transición r_t que es menor que el radio externo a, (iii) un índice de refracción máximo n_0 , (iv) un índice de refracción mínimo n_{ci} , y (v) un perfil de índice gradual $n(r)$ que es una función de la distancia radial r desde el centro de dicho núcleo central, donde dicho núcleo central está co-dopado con, al menos, flúor, F, y germanio, GeO_2 , , en donde el perfil $n(r)$ de índice gradual del núcleo central se define mediante la siguiente ecuación:

$$n(r) = n_0 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^{\alpha(r)}}$$

donde:

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

donde el parámetro alfa $\alpha(r)$ es una función de la distancia radial r del centro de dicho núcleo central, teniendo dicho parámetro alfa $\alpha(r)$ dos o más valores diferentes a lo largo de posiciones radiales desde el centro de dicho núcleo central hasta el radio a externo del núcleo central;

donde la relación en peso de flúor F en el centro del núcleo ($[F]_{r=0}$) está comprendida entre el 0 y 3% en peso y la relación en peso de flúor F en el radio exterior del núcleo ($[F]_{r=a}$) se encuentra comprendida entre el 0,5% en peso y el 5,5% en peso, con $[F]_{r=a} - [F]_{r=0} >$ del 0,4% en peso.

[0021] La presente invención, por lo tanto, se basa en un enfoque novedoso e inventivo de fibras ópticas multimodo. En realidad, propone una fibra óptica multimodo adaptada a aplicaciones de banda ancha que usa un alto nivel de dopaje de flúor y germanio, lo que permite diseñar perfiles de índice de refracción con el índice de refracción de la parte exterior del núcleo de índice gradual próximo al índice de refracción de la sílice pura. Las altas variaciones de composición con el radio implican utilizar un parámetro alfa que varía con el radio del núcleo.

[0022] Una invención de este tipo permite, por lo tanto, diseñar fibras multimodo con prestaciones de OM4 en una ventana operativa mayor de 150 nm centrada en la longitud de onda operativa óptima.

[0023] En realidad, según un aspecto de la presente invención, para longitudes de onda comprendidas entre 850 nm y 1100 nm, dicha fibra óptica multimodo tiene un ancho de banda de lanzamiento sobresaturado (OFL-BW) superior a 3500 MHz.km en un rango de longitud de onda de funcionamiento continuo superior a 150 nm.

[0024] Según otro aspecto de la presente invención, para longitudes de onda comprendidas entre 850 nm y 1100 nm, dicha fibra óptica multimodo tiene un ancho de banda modal efectivo calculado (EMBc) superior a 4700 MHz.km en un rango de longitud de onda operativa continua superior a 150 nm.

[0025] De acuerdo con un aspecto de la presente invención, Δ está comprendida entre el 0,7% y el 1,5%.

[0026] De acuerdo con otro aspecto de la presente invención, la fracción molar de GeO_2 en el radio exterior del núcleo ($[\text{Ge}]_{r=a}$) está comprendida entre el 1,5% en moles y el 17,5% en moles.

[0027] De acuerdo con otro aspecto de la presente invención, la fracción molar del GeO_2 en el centro del núcleo ($[\text{Ge}]_{r=0}$) se encuentra comprendida entre el 9,5% en moles y el 30% en moles.

[0028] De acuerdo con otro aspecto más, para una posición radial menor que el radio de transición r_t del núcleo central, el parámetro alfa $\alpha(r)$ tiene un primer valor α_1 y, para una posición radial mayor que el radio de transición del núcleo central r_t , el parámetro alfa $\alpha(r)$ tiene un segundo valor distinto α_2 .

[0029] De acuerdo con otro aspecto, dicho perfil de índice gradual del núcleo central, está definido mediante la siguiente ecuación de potencia

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \cdot \sqrt{1 - 2\Delta_1 \left(\frac{r}{a}\right)^{\alpha_1}} & 0 \leq r \leq r_t \\ n_2 \cdot \sqrt{1 - 2\Delta_2 \left(\frac{r}{a}\right)^{\alpha_2}} & r_t \leq r \leq a \\ n_{cl}(r) & a < r \end{cases}$$

donde

$$\Delta_1 = \frac{\alpha_2 \Delta \left(\frac{r_t}{a}\right)^{\alpha_2 - \alpha_1}}{\alpha_1 + (\alpha_2 - \alpha_1) \left(\frac{r_t}{a}\right)^{\alpha_2}},$$

$$\Delta_2 = \frac{\alpha_1 \Delta}{\alpha_1 + (1 - 2\Delta)(\alpha_2 - \alpha_1) \left(\frac{r_t}{a}\right)^{\alpha_2}},$$

$$n_1 = \frac{n_{cl}}{\sqrt{1 - 2\Delta}},$$

y

$$n_2 = n_{cl} \cdot \sqrt{\frac{(1-2\Delta)(\alpha_1-\alpha_2)\left(\frac{r_t}{a}\right)^{\alpha_2} - \alpha_1}{(1-2\Delta)\left((\alpha_1-\alpha_2)\left(\frac{r_t}{a}\right)^{\alpha_2} - \alpha_1\right)}}$$

[0030] De acuerdo con otro aspecto, el primer valor alfa α_1 está comprendido entre aproximadamente 1,945 y 2,07.

5 **[0031]** De acuerdo con otro aspecto más, el segundo valor alfa α_2 está comprendido entre aproximadamente 1,945 y 2,07 con $0,001 \leq |\alpha_1 - \alpha_2| \leq 0,1$.

[0032] De acuerdo con otro aspecto más, dicho parámetro r_t de radio de transición está comprendido entre aproximadamente 0,2 y 0,9.

10 **[0033]** De acuerdo con otro aspecto más, dicho radio externo a del núcleo central está comprendido entre aproximadamente $20\mu\text{m}$ y $40\mu\text{m}$.

[0034] De acuerdo con otro aspecto más, la relación en peso de flúor F $[F](r)$ es una función de la distancia radial r desde el centro de dicho núcleo central expresada como:

$$[F](r) = [F](0) + \left(\frac{r}{a}\right)^p \cdot ([F](a) - [F](0)),$$

15

donde p , es una constante esencialmente igual a 2.

[0035] De acuerdo con otro aspecto, una fibra multimode tal cumple la siguiente regla:

$$0.017([F](a) - [F](0)) - 0.107 < |\alpha_1 - \alpha_2| < 0.017([F](a) - [F](0)) + 0.006$$

20 con $\alpha_1 \neq \alpha_2$

[0036] Aún de acuerdo con otro aspecto, una fibra multimodo tal cumple la siguiente regla:

$$\delta_c = \frac{[F](a) - [F](0)}{[Ge](0) - [Ge](a)}$$

$|\alpha_1 - \alpha_2| > 0,0013e^{0,7\delta_c}$ con expresado en peso/moles.

25 **[0037]** Según otra realización, la relación en peso de flúor F en el radio exterior central ($[F]r=a$) está comprendida entre el 0,85% en peso y el 5,5% en peso, con $[F]r=a - [F]r=0 >$ del 0,85% en peso.

[0038] Además, para longitudes de onda comprendidas entre 800 nm y 1200 nm, dicha fibra óptica multimodo tiene un ancho de banda de lanzamiento sobresaturado (OFL-BW) superior a 3500 MHz.km en un rango de longitud de onda operativa continua superior a 175 nm.

30 **[0039]** Además, para longitudes de onda comprendidas entre 800 nm y 1200 nm, dicha fibra óptica multimodo tiene un ancho de banda modal efectivo calculado (EMBc) superior a 4700 MHz.km en un rango de longitud de onda de funcionamiento continuo superior a 175 nm.

[0040] De acuerdo con otra realización más, la relación en peso de flúor F en el radio externo del núcleo ($[F]r=a$) está comprendida entre el 2,0% en peso y el 5,5% en peso, con $[F]r=a - [F]r=0 >$ del 1,8% en peso.

35 **[0041]** Además, para longitudes de onda comprendidas entre 750 nm y 1300 nm, dicha fibra óptica multimodo tiene un ancho de banda de lanzamiento sobresaturado (OFL-BW) superior a 3500 MHz.km en un intervalo de longitud de onda de funcionamiento continuo superior a 200 nm.

[0042] Además, para longitudes de onda comprendidas entre 750 nm y 1300 nm, dicha fibra óptica multimodo tiene un ancho de banda modal efectivo calculado (EMBc) superior a 4700 MHz.km en un rango de longitud de onda de funcionamiento continuo superior a 200 nm.

40 **[0043]** En una realización especial de una fibra óptica multimodo de acuerdo con la presente invención, dicho revestimiento óptico comprende una región, denominada zanja, de índice de refracción deprimido n_{trench} , que rodea el núcleo óptico, teniendo dicha zanja una anchura w_2 . Preferentemente, dicho ancho de zanja w_2 está comprendido entre aproximadamente $0,4\mu\text{m}$ y $2,5\mu\text{m}$ y la diferencia de índice de zanja-revestimiento $\Delta n_2 = n_{trench} - n_{cl}$ está comprendida entre aproximadamente $-2,0 \times 10^{-3}$ y 0.

45 **[0044]** En otra realización especial de una fibra óptica multimodo de acuerdo con la presente invención, dicha óptica el revestimiento comprende una capa de revestimiento interior que rodea directamente dicho núcleo, teniendo dicha capa de revestimiento interior una anchura w_2 y una diferencia de índice de refracción Δn_2 , y una región, denominada zanja, de índice de refracción deprimido que rodea dicha capa de revestimiento interior, teniendo dicha zanja una anchura w_3 y una diferencia de índice de refracción $\Delta n_3 = n_{trench} - n_{cl}$. Preferentemente, dicho ancho de capa de revestimiento interior w_2 está comprendido entre aproximadamente $0,4\mu\text{m}$ y $2,5\mu\text{m}$ y dicha diferencia de índice de refracción Δn_2 está comprendida entre aproximadamente $-1,5 \times 10^{-3}$ y $1,5 \times 10^{-3}$, y dicho ancho de zanja w_3 está comprendido entre aproximadamente $1,5\mu\text{m}$ y $5,0\mu\text{m}$ y dicha diferencia de índice de refracción Δn_3 está comprendida entre aproximadamente $-7,5 \times 10^{-3}$ y $-1,5 \times 10^{-3}$.

55 **[0045]** La presente invención se refiere además a un sistema óptico multimodo que comprende al menos una porción de una fibra óptica multimodo como se describió anteriormente.

4. Breve descripción de los dibujos

[0046] La invención puede entenderse mejor con referencia a la siguiente descripción y dibujos, dados a modo de ejemplo y sin limitar el alcance de la protección, y en los que:

- La figura 1 muestra la diferencia de índice de refracción a 633 nm de sílice dopada con flúor;
 - la figura 2 muestra un perfil de índice de refracción para un ejemplo de fibra óptica según la invención;
 - la figura 3 muestra el perfil de índice de refracción y el perfil de concentración de flúor para un ejemplo (ejemplo 1) de una fibra óptica según la invención;
 - La figura 4 muestra el ancho de banda modal efectivo calculado (EMBc) para varias fibras multimodo correspondientes o no a realizaciones de la invención;
 - la figura 5 muestra un perfil de índice de refracción para otro ejemplo de fibra óptica según la invención;
 - la figura 6 muestra el perfil de índice de refracción y los perfiles de concentración de flúor para varios ejemplos (ejemplos 7, 8 y 9) de una fibra óptica según la invención;
 - la figura 7 muestra el perfil de índice de refracción y el perfil de concentración de flúor para un ejemplo (ejemplo 13) de una fibra óptica según la invención y para una fibra óptica comparativa fuera del alcance de la invención;
 - la figura 8 muestra el ancho de banda de lanzamiento sobresaturado (OFL-BW) para un ejemplo (ejemplo 13) de una fibra óptica según la invención y para una fibra óptica comparativa fuera del alcance de la invención;
- La figura 9 es un diagrama esquemático de un sistema de multiplexado por división de longitud de onda a modo de ejemplo según la presente invención.

[0047] Los componentes en las figuras no están necesariamente a escala, poniendo énfasis en lugar de ilustrar los principios de la invención.

[0048] A lo largo de este documento, los términos germanio, Ge y GeO₂ se usan igualmente para referirse al dopante GeO₂.

5. Descripción detallada

[0049] A lo largo de este documento, el término ventana operativa designa el rango de longitudes de onda para el cual la fibra óptica multimodo exhibe un ancho de banda mayor que el valor definido en la especificación OM4. Según la fuente utilizada, los siguientes ejemplos consideran un ancho de banda modal efectivo calculado EMBc > 4700MHz.km o un ancho de banda de lanzamiento sobresaturado OFL-BW > 3500MHz.km. El procedimiento definido en el estándar FOTP-220 y el estándar IEC 60793-1-49, se usa para calcular el ancho de banda modal efectivo calculado EMBc a partir de las mediciones DMD (por "Retardo del Modo Diferencial"), cualquiera que sea la longitud de onda utilizada (mismas funciones de ponderación).

[0050] La fibra multimodo de acuerdo con una realización de la invención comprende un núcleo central rodeado por un revestimiento óptico externo. El núcleo central tiene (i) un radio exterior a, (ii) un radio de transición r_t que es menor que el radio exterior a, (iii) un índice de refracción máximo n₀, (iv) un índice de refracción mínimo n_{cl}, y (v) un perfil de índice gradual n(r) que es una función de la distancia radial r desde el centro de dicho núcleo central.

[0051] El núcleo y el revestimiento forman la porción de vidrio de la fibra óptica. En algunas realizaciones, el revestimiento se recubre con uno o más recubrimientos, por ejemplo con un polímero de acrilato.

[0052] Para extender la ventana operativa a más de 150 nm mientras se mantiene un índice de refracción sustancialmente igual al índice de refracción de la sílice pura, en el núcleo central de índice gradual, se requieren tanto altas concentraciones de flúor como de germanio. La relación de peso [F](r) entre el flúor y todos los constituyentes de la matriz de dopado del núcleo central puede expresarse en función de la distancia radial r desde el centro de la fibra de la siguiente manera:

$$[F](r) = [F](0) + \left(\frac{r}{a}\right)^p \cdot ([F](a) - [F](0))$$

con [F](0) como la relación en peso de flúor en el centro del núcleo, [F](a) como la relación en peso de flúor al final del perfil alfa de radio a y p una constante sustancialmente igual a 2.

[0053] La figura 1 ilustra la relación entre la relación en peso [F] (indicada como CF en la figura 1) expresada en % en peso y la contribución a la diferencia del índice de refracción con SiO₂. Por ejemplo, una concentración de flúor en la matriz de vidrio del 1% en peso permite disminuir el índice de refracción de sílice pura de -3.5×10^{-3} .

[0054] De acuerdo con las realizaciones de la invención, la concentración de flúor en el centro del núcleo [F](0) (también indicada como [F]_{r=0}) es de entre el 0% en peso y el 3% en peso la concentración de flúor en el núcleo exterior radio [F](a) (también indicada como [F]_{r=a}) está comprendida entre el 0,5% y el 5,5% en peso, con [F]_{r=a} - [F]_{r=0} > 0,4% en peso. La concentración de germanio en el radio exterior central [Ge](a) (también indicada como [Ge]_{r=a}) está comprendida entre el 1,5% y el 17,5% en mol.

[0055] Con tales variaciones de composición con el radio, la dispersión modal típicamente no se puede compensar perfectamente ajustando el valor alfa. De hecho, el retardo no es constante en todo el radio del núcleo, sea cual sea el valor de alfa, y los retardos de tiempo no varían uniformemente con la longitud de onda debido al cambio de la dispersión cromática con el radio. Lo cual implica utilizar un parámetro alfa que varíe con el radio del núcleo para mejorar aún más el ancho de banda. El perfil de índice gradual n(r) del núcleo central se define mediante la siguiente ecuación de potencia:

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \cdot \sqrt{1 - 2\Delta_1 \left(\frac{r}{a}\right)^{\alpha_1}} & 0 \leq r \leq r_t \\ n_2 \cdot \sqrt{1 - 2\Delta_2 \left(\frac{r}{a}\right)^{\alpha_2}} & r_t \leq r \leq a \\ n_{cl}(r) & a < r \end{cases}$$

donde:

5

$$\Delta_1 = \frac{\alpha_2 \Delta \left(\frac{r_t}{a}\right)^{\alpha_2 - \alpha_1}}{\alpha_1 + (\alpha_2 - \alpha_1) \left(\frac{r_t}{a}\right)^{\alpha_2}},$$

$$\Delta_2 = \frac{\alpha_1 \Delta}{\alpha_1 + (1 - 2\Delta)(\alpha_2 - \alpha_1) \left(\frac{r_t}{a}\right)^{\alpha_2}},$$

$$n_1 = \frac{n_{cl}}{\sqrt{1 - 2\Delta}}$$

10 y

$$n_2 = n_{cl} \cdot \sqrt{\frac{(1 - 2\Delta)(\alpha_1 - \alpha_2) \left(\frac{r_t}{a}\right)^{\alpha_2} - \alpha_1}{(1 - 2\Delta) \left((\alpha_1 - \alpha_2) \left(\frac{r_t}{a}\right)^{\alpha_2} - \alpha_1 \right)}}$$

15

[0056] La figura 2, muestra una forma de perfil de índice de refracción de una fibra multimodo según una realización de la invención, expresada como la diferencia de índice de refracción Δn en función del radio. Como puede observarse, el núcleo central de radio exterior a , comprende un primer núcleo interior que muestra un perfil de índice gradual con un primer valor α_1 . Tal núcleo interior se extiende desde el centro del núcleo hasta un radio de transición $R_t = r_t \cdot a$. El núcleo central también comprende un núcleo exterior que muestra un perfil de índice gradual con un segundo valor α_2 . Tal núcleo exterior se extiende desde el radio de transición $R_t = r_t \cdot a$ hasta el radio a del núcleo exterior.

20

[0057] El núcleo está rodeado por un revestimiento óptico, que comprende una capa interna de índice de refracción deprimido que rodea directamente el núcleo, de ancho w_2 y que muestra una diferencia de índice de refracción Δn_2 .

[0058] La tabla 1 a continuación describe algunos ejemplos de fibras ópticas multimodo según las realizaciones de la invención, que muestran una forma de perfil según la figura 2, y con un radio de núcleo de 25 μm .

25

Tabla 1

Ejemplos	a (μm)	Δ (%)	Alfa 1	Alfa2	Rt	W2 μm	Δn_2 (10^{-3})	W (μm)	Δn_3 (10^{-3})	CGe(0) (%mol)	CGe(a) (%mol)	CF(0) % peso	CF(a) % peso	Longitud de onda óptima (nm)	EMBc opt (MHz.km) (nm)	Ventana operativa EMBc>4,7 GHz.km (nm)	Ancho Ventana operativa EMBc (nm)	Ventana operativaOF L-BW>3,5 GHz.km (nm)	Ancho Ventana operativa OFL-BW (nm)
Ej.1	25	1,0	1,980	1,981	0,60	1,4	-0,8	0	0	18,8	13,6	1,62	4,30	1050	13365	945-1185	240	905-1170	265
Ej.2	25	1,0	1,995	1,996	0,41	1,8	-0,7	0	0	18,0	13,5	1,37	4,29	950	15873	840-1080	240	785-1080	295
Ej.3	25	1,0	1,993	2,015	0,58	1,4	-0,8	0	0	14,3	7,2	0,20	2,27	1050	9173	980-1160	180	930-1115	185
Ej.4	25	1,0	1,998	1,960	0,25	1,8	-0,7	0	0	17,3	16,3	2,01	5,16	880	14202	650-1180	530	600-1210	610
Ej.5	25	1,0	2,002	2,070	0,77	1,8	-0,7	0	0	22,6	15,3	2,85	4,85	950	11896	865-1065	200	800-1065	265
Ej.6	25	1,0	1,999	1,977	0,46	1,8	-0,7	0	0	13,6	11,7	0,00	3,67	950	14778	845-1075	230	780-1040	260

- 5 **[0059]** Todos los ejemplos desvelados en la tabla 1 tienen un ancho de banda modal efectivo $EMB_c > 4700\text{MHz.km}$ y un ancho de banda de lanzamiento sobresaturado $OFL-BW > 3500\text{MHz.km}$ en un rango de longitud de onda operativa mayor de 150 nm centrado en la longitud de onda óptima. Este efecto de banda ancha se logra añadiendo un alto nivel de concentración de flúor en el núcleo de la fibra multimodo, combinado con una forma "doble alfa", con parámetros α_1 , α_2 y r_t seleccionados para maximizar el valor de EMB_c para la longitud de onda óptima.
- 10 **[0060]** La figura 3 muestra el perfil de índice de refracción (indicado como perfil de RI) y el perfil de concentración de flúor (indicado como CF) del primer ejemplo de realización de la invención, denominado ej.1, mencionado en la tabla 1 anterior.
- [0061]** La tabla 2 a continuación presenta algunos ejemplos comparativos, que, al contrario de los ejemplos en la tabla 1 anterior, se encuentran todos fuera del alcance de la presente invención.

Tabla 2

Ejemplos	a (μm)	Δ (%)	Alfa 1	Alfa 2	Rt	W2 (μm)	Δn_2 (10^{-5})	W3 (μm)	Δn_3 (10^{-3})	CGeI(0) (%mol)	CGeI(a) (%mol)	CF(0) % en peso	CF(a) % en peso	Longitud de onda optima (nm)	EMBc opt (MHz.km)	Ventana operativa EMBc >4,7 GHz.km (nm)	Ancho Ventana operativa EMBc (nm)	Ventana operativa OFL-BW >3,5 GHz.km (nm)	Ancho Ventana operativa OFL-BW (nm)
Ej. 1C	25	1,0	2,045	2,045	-	1,8	-0,7	0	0	13,6	0,0	0,0	0,00	950	15129	890-1015	125	875-995	120
Ej. 2C	25	1,0	1,985	1,985	-	0,9	-0,2	0	0	0	13,3	0,0	4,20	950	6950	875-1030	155	775-975	200
Ej.3C	25	1,0	2,040	2,060	0,64	1,8	-0,7	0	0	13,6	0,0	0,0	0,00	950	9598	900-1010	110	865-995	130
Ej.4C	25	1,0	2,070	2,070	0,75	1,8	-0,7	0	0	22,6	9,1	2,8	2,85	950	15149	900-1015	115	885-1015	130

[0062] El ejemplo comparativo ej.1c en la tabla 2, tiene el mismo índice de refracción que en el ejemplo ej. 2 en la tabla 1, pero el núcleo de la fibra multimodo del ejemplo ej. 1c, solo está dopado con germanio. No hay flúor en el núcleo de índice gradual. Además, se ha elegido un alfa único (es decir, $\alpha_1 = \alpha_2$) para maximizar el ancho de banda modal efectivo calculado EMBc a 950 nm. Este valor óptimo está muy cercano del valor óptimo de EMBc del ejemplo ej. 2. Pero disminuye drásticamente cuando la fibra se utiliza en otra longitud de onda de 950 nm. Por lo tanto, el ancho de la ventana operativa donde la fibra multimodo del ejemplo ej.1c, tiene una EMBc mayor de 4700MHz.km es solo de 125nm, mientras que se extiende sobre 240nm por ejemplo el ej.2 que tiene una concentración del 1,37% en peso de flúor en el centro del núcleo y el 4,29% en peso en el radio exterior del núcleo.

[0063] La fibra óptica multimodo del ejemplo comparativo ej.3c de la tabla 2, también está dopada en el núcleo solo con germanio, con el mismo índice de refracción que en el ejemplo ej.2 en la tabla 1 y ej.1c en la tabla 2, pero con un forma en doble alfa. Sin embargo, como puede observarse a partir de los resultados de ancho de banda mostrados en la tabla 2, no hay ganancia por usar un perfil de doble alfa cuando el núcleo solo está dopado con germanio, sin ningún dopado de flúor. El ancho de banda modal efectivo calculado óptimo EMBc, es de alrededor de 950 nm, como en los ejemplos ej. 2 y ej. 1c, pero con un valor máximo menor que el obtenido con los ejemplos ej.2 y ej.1c. Aquí nuevamente, el ancho de la ventana operativa para EMBc > 4700MHz.km es mucho más estrecho que, por ejemplo, el ej.2.

[0064] La figura 4, representa la variación del ancho de banda modal efectivo calculado EMBc (expresado en MHz.km) con la longitud de onda (expresada en nm) por ejemplo ej.2, correspondiente a una realización de la invención, como se muestra en la tabla 1, y para los ejemplos comparativos ej.1c y ej.3c, que están fuera del alcance de la invención, como se muestra en la tabla 2. El límite EMBc de 4700MHz.km también se añade para comparación. Como puede observarse a partir de la figura 4, la fibra multimodo del ejemplo ej. 2, cumple con mucho el rango de longitud de onda de funcionamiento continuo más amplio para el cual el ancho de banda modal efectivo calculado (EMBc) es mayor que 4700MHz.km.

[0065] La fibra óptica multimodo del ejemplo comparativo ej. 4c en la tabla 2 tiene un núcleo, que está altamente codopado con Ge y F, y los parámetros α_1 , α_2 y r_1 se han ajustado para maximizar el ancho de banda modal efectivo calculado EMBc a 950 nm. Sin embargo, aunque la fibra multimodo del ejemplo ej.4c muestra el mismo perfil de índice de refracción y el mismo nivel de dopado en el centro del núcleo que en el ejemplo ej.5 en la tabla 1, la concentración de flúor es constante a lo largo del radio dentro el núcleo de índice gradual. Como consecuencia, el ancho de la ventana operativa del ej. 4c con EMBc > 4700MHz.km es solo de 130 nm (en lugar de 200nm para el ejemplo ej. 5 en la tabla 1).

[0066] La fibra óptica multimodo del ejemplo comparativo ej.2c en la tabla 2 es una fibra óptica multimodo, cuyo núcleo de índice gradual solo está dopado con flúor. No hay germanio en el núcleo de índice gradual. Además, se eligió un único alfa ($\alpha_1 = \alpha_2$) y los parámetros w_2 y Δn_2 de la capa de revestimiento deprimido en la interfaz núcleo-revestimiento para maximizar el ancho de banda modal efectivo calculado EMBc a 950 nm. Aunque esta realización permite alcanzar una ventana operativa de longitud de onda, en la cual el ancho de banda de lanzamiento sobresaturado OFL-BW es mayor de 3500MHz.km, con un ancho de 200nm, una fibra óptica multimodo de flúor completo no permite alcanzar un ancho de banda modal efectivo calculado EMBc mayor de 6950MHz.km. La ventana operativa de longitud de onda para el ancho de banda modal efectivo calculado EMBc mayor de 4700MHz.km no es mayor que 155nm. Tal rango de funcionamiento de longitud de onda es mucho más estrecho que el que se puede lograr en realizaciones de la presente invención, gracias a la utilización combinada de altos niveles de germanio y flúor en el núcleo de índice gradual, con una forma alfa de índice de refracción que varía con el radio

[0067] Además, en el ejemplo ej. 2c, que es una fibra óptica multimodo con un núcleo de índice gradual solo dopado con flúor, la parte exterior del núcleo tiene un índice de refracción de núcleo n_{outer} mucho más bajo que el índice de refracción de la sílice n_{silica} , tal como:

$$n_{outer\ core} - n_{silica} = -14.7 \times 10^{-3}.$$

[0068] Como consecuencia, y para mantener un índice de refracción del revestimiento al nivel de la parte exterior del núcleo, se requiere dopar altamente el revestimiento exterior con flúor. Tal perfil de índice de refracción es muy complejo de lograr, especialmente para procesos de deposición tales como MCVD y PCVD, que requieren depositar las diferentes capas dopadas dentro de un tubo de sustrato. Por lo tanto, es necesario gestionar las pérdidas de fuga y/o añadir un revestimiento exterior deprimido.

[0069] Además, con un revestimiento exterior dopado con flúor, se hace difícil considerar conceptos como "asistidos por trincheras" que requieren más dopado en F del revestimiento. Se requerirían niveles de concentración de flúor que difícilmente pueden alcanzarse con los procesos de deposición existentes. Como un mero ejemplo, la fibra óptica multimodo del ejemplo ej. 2c, requeriría una relación en peso de flúor mayor de aproximadamente el 5% en peso, para agregar una trinchera que muestre una diferencia de índice de refracción Δn_3 menor que -1×10^{-3} .

[0070] La figura 5 ilustra el perfil de índice de refracción de una fibra óptica multimodo de acuerdo con una segunda realización de la invención.

[0071] En esta segunda realización, se puede añadir una zanja de diferencia de índice de refracción Δn_3 y ancho w_3 después de la capa de revestimiento interior de diferencia de índice de refracción Δn_2 y ancho w_2 , que se encuentra rodeando directamente el núcleo óptico, con el fin de mejorar las prestaciones de pérdidas por curvatura de la fibra óptica multimodo.

[0072] La tabla 3 a continuación describe cuatro fibras ópticas multimodo (ejemplos ej. 7 a ej. 10) de acuerdo con realizaciones de la presente invención, mostrando todas ellas un perfil de índice de refracción asistido por zanja de

acuerdo con la figura 5. La tabla 3 también describe un ejemplo comparativo ej. 5c, que está fuera del alcance de la presente invención, aunque también presenta un perfil de índice de refracción según la figura 5. Todas las fibras ópticas multimodo enumeradas en la tabla 3 tienen un radio de núcleo de 25 μm .

Tabla 3

Ejemplo	a (μm)	Δ (%)	Alfa 1	Alfa 2	Rt	W2 (μm)	Δn_2 (10^{-3})	W3 (μm)	Δn_3 (10^{-3})	CGe(0) (%mol)	CGe(a) (%mol)	CF(0) % peso	CF(a) % peso	Longitud de onda óptima (nm)	EMBc opt (MHz.km)	Ventana operativa GHz.km (nm)	EMBc (nm)	Ancho Ventana operativa EMBc (nm)	Ventana operativa BW>3,5 GHz.km (nm)	Ancho Ventana operativa OFL-BW (nm)
Ej. 7	25	1,0	1,979	1,966	0,47	1,4	0,2	4,2	-5,5	19,6	16,3	1,87	5,16	950	15554	800-1120	320	725-1140	415	
Ej. 8	25	1,0	1,960	1,951	2,203	1,4	0,2	4,2	-5,5	14,9	15,7	0,41	4,96	1000	6577	895-1135	240	665-1150	485	
Ej. 9	25	1,0	2,033	1,986	0,26	1,4	0,2	4,2	-5,5	13,6	10,3	0,00	3,24	1000	15442	905-1115	210	880-1125	245	
Ej.10	25	1,0	2,020	1,989	0,28	1,7	-0,2	3,5	-6	15,5	10,8	0,46	3,42	1000	17433	900-1115	215	870-1120	250	
Ej.5C	25	1,1	2,035	2,035	-	1,2	-	4,4	-	15,3	2,8	0,00	0,85	950	10735	900-1010	110	890-965	75	

[0073] Como puede observarse a partir de la tabla 3, los ejemplos ej.7, ej.8 y ej.9, tienen tres perfiles de concentración de flúor diferentes, que se muestran en la figura 6, que ilustra la relación en peso de flúor CF, expresada en % en peso, como una función del radio expresado en micrómetros. Más precisamente, las fibras ópticas multimodo de los ejemplos ej.7, ej.8 y ej.9, tienen el mismo perfil de índice de refracción (que se muestra en la figura 6), pero exhiben diferentes valores α_1 , α_2 y r_i , que se eligen para maximizar el ancho de banda modal efectivo calculado EMBc a la longitud de onda óptima, de acuerdo con su concentración de flúor.

[0074] Todos los ejemplos de fibras multimodo de acuerdo con las realizaciones de la invención listadas en la tabla 3 tienen un rango de longitud de onda de funcionamiento continua mayor que 200 nm, sobre el cual el ancho de banda modal efectivo calculado EMBc es mayor que 4700MHz.km.

[0075] Comparando los rendimientos de las realizaciones ejemplares en la tabla 1 y la tabla 3, se puede observar que la adición de una zanja en el revestimiento exterior, con ancho w_2 y altura Δn_2 ajustados de acuerdo con la dimensión de la zanja, no limita el ancho de la ventana operativa, cuando los niveles de concentración de flúor y Ge son suficientemente altos.

[0076] La fibra óptica multimodo del ejemplo ej.10 de la tabla 3 tiene un perfil de índice de refracción, que difiere del de los ejemplos ej. 7, ej.8 y ej.9. Sin embargo, muestra un rendimiento de ancho de banda similar al del ejemplo ej.9, pero con otro perfil de concentración de flúor. La fibra óptica multimodo del ejemplo ej. 10 también corresponde a una realización ejemplar de la presente invención.

[0077] Por el contrario, el ejemplo comparativo ej. 5c, se encuentra fuera del alcance de la presente invención. Dicha fibra óptica multimodo tiene un núcleo de índice gradual alfa único ($\alpha_1 = \alpha_2$), que contiene el 0,85% en peso de flúor en el exterior del núcleo, y una capa de revestimiento interior que rodea directamente el núcleo con parámetros Δn_2 y w_2 , ajustados para maximizar el ancho de banda modal efectivo calculado EMBc a 950 nm. Sin embargo, como puede observarse a partir de los resultados en la tabla 3, tales características no permiten alcanzar una ventana operativa, en la cual el EMBc sea mayor de 4700MHz.km, mayor que 110nm; en lo que respecta al rango de longitud de onda de funcionamiento, en el que el ancho de banda de lanzamiento sobresaturado es superior a 3,5 GHz.km, no es superior a 75 nm.

[0078] La tabla 4 a continuación describe otros ejemplos (ej. 11, ej. 12 y ej. 13) de acuerdo con las realizaciones de la presente invención, que corresponden a fibras ópticas multimodo con el radio del núcleo $a = 40 \mu\text{m}$, así como en un ejemplo comparativo ej. 6c.

Tabla 4

Ejemplos	a (μm)	Δ (%)	Alfa 1	Alfa 2	t^*	W2 (μm)	Δn_2 (10^{-3})	W3 (μm)	Δn_3 (10^{-3})	CGe(0) %mol	CGe(a) %mol	CF(0) % en peso	CF(a) % en peso	Longitud de onda optima (nm)	OFL-BW Optima (MHz.km)	Ventana operativa OFL-BW-3,5 GHz.km (nm)	Ancho OFL-BW (nm)	Ventana operativa
Ej.11	40	1,0	2,040	2,070	0,85	1,8	-0,7	0	0	15,0	2,7	0,43	0,85	925	12201	855-1020	165	
Ej.12	40	1,0	2,002	1,979	0,50	1,8	-0,7	0	0	15,0	11,6	0,43	3,63	925	14563	780-1080	300	
Ej.13	40	1,0	1,999	1,987	0,43	1,7	0,4	4	-6,5	18,6	13,6	1,56	4,29	900	12975	790-1090	300	
Ej.6C	40	1,0	2,045	2,045	-	1,7	0,4	4	-6,5	13,7	1,4	0,00	0,42	900	13231	850-1000	150	

[0079] Como se puede observar en la tabla 4, el ejemplo ej.11, es una fibra óptica multimodo de índice gradual con los parámetros α_1 , α_2 , r_t , Δn_2 y w_2 elegidos para maximizar el ancho de banda de lanzamiento sobresaturado OFL-BW en una longitud de onda de 925nm. Un ajuste preciso de la relación en peso de flúor, con $[F](0)=$ al 0,43% en peso en el centro del núcleo y $[F](a) =$ al 0,85% en peso en el radio del núcleo exterior, permite mantener un ancho de banda de lanzamiento sobresaturado OFL-BW mayor a 3500MHz.km en un rango de longitud de onda continua que se extiende desde 855nm a 1020nm.

[0080] El ejemplo ej.12 muestra el mismo perfil de índice de refracción y la misma concentración de flúor en el centro del núcleo como en el ejemplo ej. 11. Los parámetros α_1 , α_2 y r_t también se eligen para maximizar el ancho de banda de lanzamiento sobresaturado OFL-BW a una longitud de onda de 925nm. Sin embargo, la fibra multimodo del ejemplo ej. 12, tiene una mayor concentración de flúor en el exterior del núcleo: $[F](a) =$ al 3.63% en peso. Como consecuencia, el ancho de la ventana operativa se ha extendido en más de 300nm, desde 780nm a 1080nm.

[0081] La figura 7 muestra el perfil del índice de refracción (perfil RI) y la concentración de flúor (CF) en función del radio, para las fibras ópticas multimodo del ejemplo ej.13 y el ejemplo comparativo ej. 6c enumerados en la tabla 4. Las fibras ópticas multimodo de los ejemplos ej.13 y ej.6c, exhiben así el mismo perfil de índice de refracción, como puede deducirse tanto de la figura 7 como de la tabla 4, pero muestran diferentes perfiles de concentración de flúor a lo largo del radio.

[0082] Como se puede observar nuevamente, la adición de una zanja en el revestimiento exterior para mejorar los rendimientos a curvatura de la fibra multimodo de índice gradual (correspondiente al ejemplo ej. 13), no impide ampliar la ventana operativa alrededor de 300nm, cuando las concentraciones de germanio y flúor son suficientemente altas.

[0083] La figura 8 ilustra el ancho de banda de lanzamiento sobresaturado de las fibras multimodo de los ejemplos ej. 13 y ej. 6c, expresado en MHz.km en función de la longitud de onda (expresada en nm). El límite OFL-BW de 3500MHz.km también se agrega a fines de comparación.

[0084] La fibra multimodo de índice gradual del ejemplo comparativo ej. 6c, tiene el mismo índice de refracción que la fibra del ejemplo ej. 13, pero presenta una baja concentración de flúor, y un núcleo de índice gradual de alfa simple ($\alpha_1 = \alpha_2$), donde el parámetro alfa se ajusta para optimizar el pico de ancho de banda alrededor de 900nm. Como se puede ver en la figura 8, tales características no permiten exceder los 150 nm de rango de longitud de onda de funcionamiento continuo, sobre el cual el ancho de banda de lanzamiento sobresaturado OFL-BW es mayor a 3500MHz.km.

[0085] La figura 9 es un diagrama esquemático que ilustra un sistema de multiplexado por división de longitud de onda de acuerdo con una realización de la presente invención. Un sistema de multiplexado por división de longitud de onda 1, incluye un multiplexor (MUX) 3 y un demultiplexor (DEMUX) 4 que están acoplados a través de una fibra óptica multimodo 2 de acuerdo con una de las realizaciones de la invención descritas previamente. En el sistema de multiplexado por división de longitud de onda 1, después de que el multiplexor 3, realiza el multiplexado de las señales ópticas con varias longitudes de onda λ_1 , λ_2 , ..., λ_n , la señal multiplexada se transmite a través de la fibra óptica multimodo 2 y se demultiplexa mediante el demultiplexor 4 .

REIVINDICACIONES

1. Fibra óptica multimodo, que comprende:

un núcleo central rodeado por un revestimiento óptico externo, teniendo dicho núcleo central (i) un radio exterior a , (ii) un radio de transición $R_t = a \cdot r_t$ que es menor que el radio exterior a , (iii) un índice de refracción máximo n_0 , (iv) un índice de refracción mínimo n_{cl} , y (v) un perfil de índice gradual $n(r)$ que es una función de la distancia radial r desde el centro de dicho núcleo central,

en la que dicho núcleo central está co-dopado con, al menos, flúor F y germanio GeO_2 , en la que dicho perfil de índice gradual $n(r)$ del núcleo central se define mediante la siguiente ecuación:

$$n(r) = n_0 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^{\alpha(r)}}$$

donde:

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

donde el parámetro alfa $\alpha(r)$ es una función de la distancia radial r desde el centro de dicho núcleo central, teniendo dicho parámetro alfa $\alpha(r)$ dos o más valores diferentes a lo largo de posiciones radiales desde el centro de dicho núcleo central hasta el núcleo central externo radio a ;

en la que la relación en peso de flúor F en el centro del núcleo ($[F]_{r=0}$) se encuentra comprendida entre el 0 y el 3% en peso y la relación en peso de flúor F en el radio exterior del núcleo ($[F]_{r=a}$) se encuentra comprendida entre 0,5% en peso y el 5,5% en peso, con $[F]_{r=a} - [F]_{r=0} > 0,4\%$ en peso; caracterizada porque la fracción molar de GeO_2 en el radio externo del núcleo ($[Ge]_{r=a}$) se encuentra comprendida entre el 1,5% en moles y el 17,5% en moles.

2. Fibra multimode de acuerdo con la reivindicación 1, en la que Δ se encuentra comprendida entre el 0,7% y el 1,5%.

3. Fibra óptica multimodo según cualquiera de las reivindicaciones 1 y 2, en la que la fracción molar de GeO_2 en el centro del núcleo ($[Ge]_{r=0}$) se encuentra comprendida entre el 9,5% en moles y el 30% en moles.

4. Fibra óptica multimodo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en la que, para una posición radial menor que el radio de transición de dicho núcleo central R_t , el parámetro alfa $\alpha(r)$ tiene un primer valor α_1 y en el que, para una posición radial mayor que el radio de transición del núcleo central R_t , el parámetro alfa $\alpha(r)$ tiene un segundo valor α_2 .

5. Fibra óptica multimodo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en la que dicho perfil de índice gradual del núcleo central se define mediante la siguiente ecuación de potencia:

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \cdot \sqrt{1 - 2\Delta_1 \left(\frac{r}{a}\right)^{\alpha_1}} & 0 \leq r \leq r_t \\ n_2 \cdot \sqrt{1 - 2\Delta_2 \left(\frac{r}{a}\right)^{\alpha_2}} & r_t \leq r \leq a \\ n_{cl}(r) & a < r \end{cases}$$

donde

$$\Delta_1 = \frac{\alpha_2 \Delta \left(\frac{r_t}{a}\right)^{\alpha_2 - \alpha_1}}{\alpha_1 + (\alpha_2 - \alpha_1) \left(\frac{r_t}{a}\right)^{\alpha_2}}$$

$$\Delta_2 = \frac{\alpha_1 \Delta}{\alpha_1 + (1-2\Delta)(\alpha_2 - \alpha_1) \left(\frac{r_t}{a}\right)^{\alpha_2}},$$

$$n_1 = \frac{n_{Cl}}{\sqrt{1-2\Delta}},$$

5 y

$$n_2 = n_{Cl} \cdot \sqrt{\frac{(1-2\Delta)(\alpha_1 - \alpha_2) \left(\frac{r_t}{a}\right)^{\alpha_2} - \alpha_1}{(1-2\Delta) \left((\alpha_1 - \alpha_2) \left(\frac{r_t}{a}\right)^{\alpha_2} - \alpha_1 \right)}}.$$

6. Fibra óptica multimodo según la reivindicación 4 o la reivindicación 5, en la que el primer valor alfa α_1 se encuentra comprendido entre aproximadamente 1,945 y 2,07.
7. Fibra óptica multimodo de acuerdo con la reivindicación 6, en la que el segundo valor alfa α_2 se encuentra comprendido entre aproximadamente 1,945 y 2,07 con $0,001 \leq |\alpha_1 - \alpha_2| \leq 0,1$.
8. Fibra óptica multimodo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en la que dicho parámetro r_t del radio de transición se encuentra comprendido entre aproximadamente 0,2 y 0,9.
9. Fibra óptica multimodo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en la que el radio exterior a del núcleo central a se encuentra comprendido entre aproximadamente 20 μm y 40 μm .
10. Fibra óptica multimodo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en la que la relación en peso de flúor F $[F](r)$ es una función de la distancia radial r desde el centro de dicho núcleo central expresada como:

$$[F](r) = [F](0) + \left(\frac{r}{a}\right)^p \cdot ([F](a) - [F](0)),$$

donde p es una constante esencialmente igual a 2.

11. Fibra multimode de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en la que $0.017([F](a) - [F](0)) - 0.107 < |\alpha_1 - \alpha_2| < 0.017([F](a) - [F](0)) + 0.006$ con $\alpha_1 \neq \alpha_2$.
12. Fibra óptica multimode de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en la que $|\alpha_1 - \alpha_2| > 0,0013e^{0,7\delta_c}$ con $\delta_c = \frac{[F](a) - [F](0)}{[Ge](0) - [Ge](a)}$ expresado en peso/moles.
13. Fibra óptica multimodo según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en la que la relación en peso de flúor F en el radio exterior del núcleo ($[F]_{r=a}$) se encuentra comprendido entre el 0,85% en peso y el 5,5% en peso, con $[F]_{r=a} - [F]_{r=0} >$ al 0,85% en peso.
14. Fibra óptica multimodo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en la que la relación en peso de flúor F en el radio externo del núcleo ($[F]_{r=a}$) se encuentra comprendida entre el 2,0% en peso y el 5,5% en peso, con $[F]_{r=a} - [F]_{r=0} >$ al 1,8% en peso.
15. Sistema óptico multimodo que comprende al menos una porción de una fibra óptica multimodo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 14.

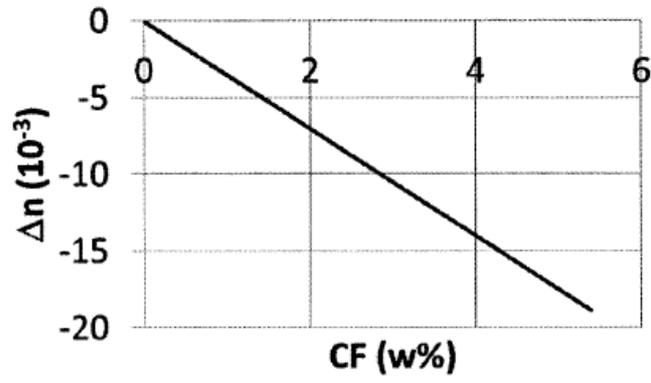


Fig. 1

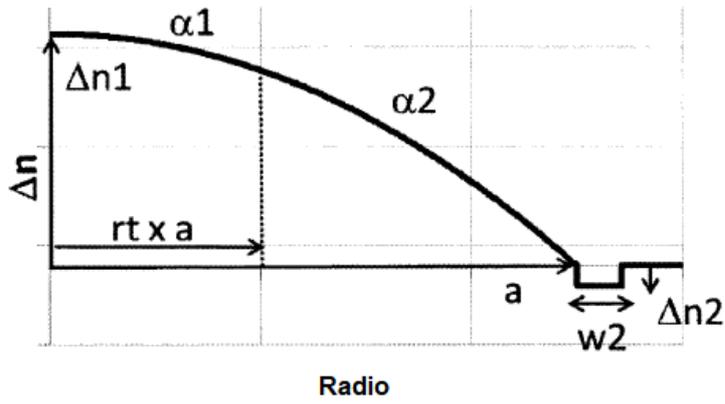


Fig. 2

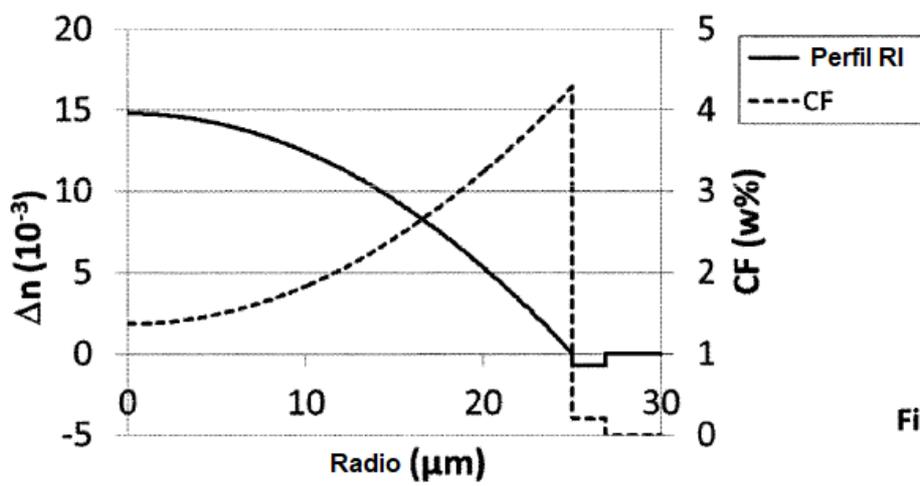


Fig. 3

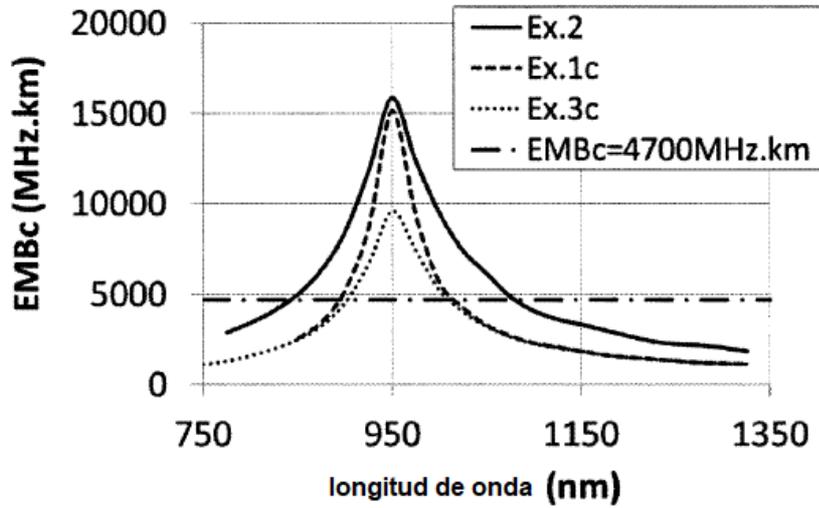


Fig. 4

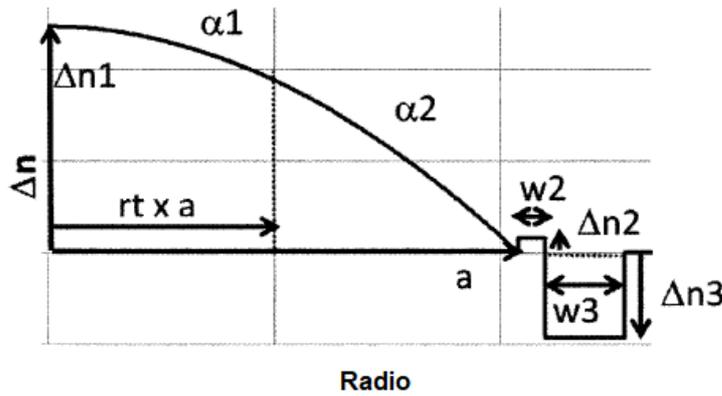


Fig. 5

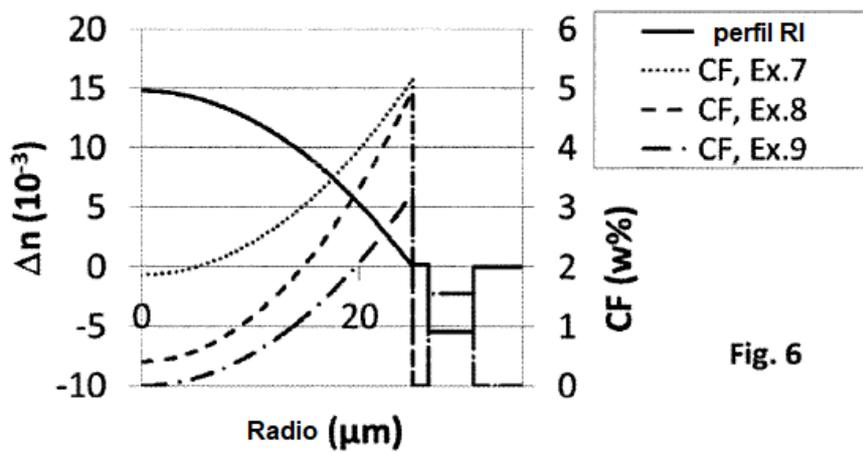


Fig. 6

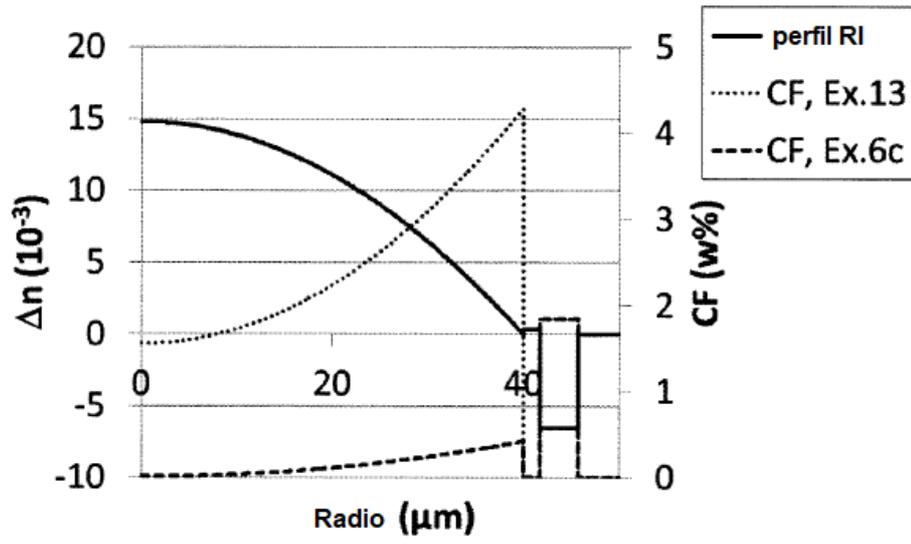


Fig. 7

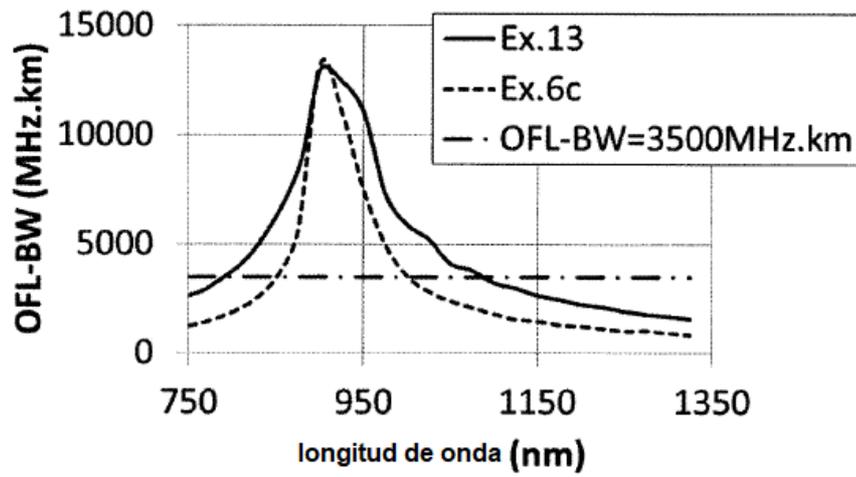


Fig. 8

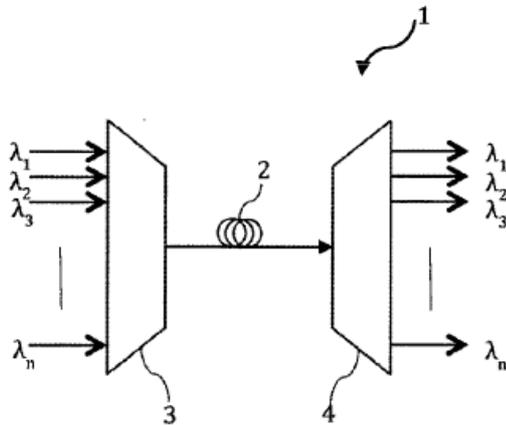


Fig. 9

REFERENCIAS CITADAS EN LA DESCRIPCIÓN

5 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 citados en la descripción

- US 7421172 B [0009]
- US 8391661 B [0011] [0012]
- US 7315677 B [0013] [0014]
- JP 2005107514 A [0015]
- US 2013114935 A [0015]

10