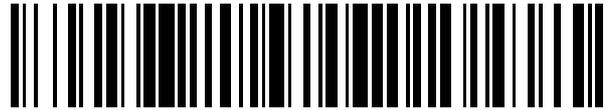


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 695 199**

51 Int. Cl.:

G02B 6/028

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **12.09.2014 PCT/IB2014/002336**

87 Fecha y número de publicación internacional: **17.03.2016 WO16038414**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **12.09.2014 E 14830540 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.09.2018 EP 3191882**

54 Título: **Fibra óptica de modos múltiples con amplio ancho de banda y el correspondiente sistema óptico de modos múltiples**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
02.01.2019

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 2 695 199 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 de modos múltiples con amplio ancho de banda y el correspondiente sistema óptico de modos múltiples.

5

Ámbito de la invención

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

10

Antecedentes

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

15

[0003] Las fibras de modos múltiples se ven afectadas por la dispersión intermodal, que resulta del hecho de que, en una fibra de modos múltiples, 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.

20

[0004] Típicamente, una fibra óptica debería tener el ancho de banda más amplio, para que sean utilizables en aplicaciones de alto ancho de banda. Para una longitud de onda dada, el ancho de banda se puede caracterizar de varias maneras diferentes. Por lo general, se hace una distinción entre el ancho de banda denominado condición de inyección saturada (OFL) y la llamada condición modal efectiva de ancho de banda (EMB). La adquisición del ancho de banda OFL armoniza el uso de una fuente de luz que presenta una excitación uniforme sobre toda la superficie radial de la fibra óptica (utilizando un diodo láser o un diodo emisor de luz (LED)). El ancho de banda modal efectivo calculado (EMBc) derivado de la medición de DMD se ha desarrollado para estimar el ancho de banda modal efectivo mínimo de la fibra con diámetro de núcleo de 50 μm bajo una excitación no homogénea sobre su superficie radial, tal como resulta cuando se usa como fuente un láser de emisión de superficie de cavidad vertical (VCSEL) funcionando a 850 nm.

25

[0005] Las realizaciones del procedimiento para medir el DMD y calcular el ancho de banda modal efectivo se pueden encontrar en la norma FOTP 220, mientras que el ancho de banda medido en condiciones de inyección saturada se describe en IEC 66793-1-41 (TIA-FOTP-204).

35

[0006] Con el fin de minimizar la dispersión modal, las fibras ópticas de modos múltiples utilizadas en las comunicaciones de datos generalmente comprenden un núcleo, generalmente dopado con germanio, y muestran 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 ", como sigue:

40

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

donde

n_1 es un índice de refracción en un eje óptico de una fibra;

r es una 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

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

50

[0007] 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 a su velocidad de propagación de manera diferente. Mediante el ajuste del 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.

55

[0008] En la práctica, sin embargo, las fibras de modos múltiples se fabrican con un núcleo central de índice gradual rodeado por un revestimiento exterior de índice de refracción constante. Por lo tanto, el núcleo de la fibra de modos múltiples nunca corresponde a un perfil alfa teóricamente perfecto, porque la interfaz del núcleo (que tiene un perfil alfa) con el revestimiento exterior (que tiene un índice de refracción constante) interrumpe el perfil alfa. El revestimiento exterior acelera los modos de orden superior en comparación con los modos de orden inferior

60

y aparecen algunas diferencias de retardo de tiempo dentro de los grupos de modo de orden superior. Este fenómeno se conoce como efecto de revestimiento. En la medición del DMD, las respuestas adquiridas para las posiciones radiales mayores (es decir, más cercanas al revestimiento exterior) exhiben múltiples impulsos, lo que da como resultado una dispersión temporal de la señal de respuesta. Por lo tanto el ancho de banda se ve disminuido por este efecto de revestimiento.

[0009] El perfil en alfa de índice gradual y la interfaz núcleo-revestimiento de las fibras de modos múltiples están optimizados para funcionar con VCSEL de Ga As 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 de LED también está garantizada para la mayoría de las fibras de modos múltiples de 50 μm y 62,5 μm actualmente en uso. Las prestaciones de tales fibras de optimización laser, fibras de modos múltiples de 50 μm de amplio ancho de banda, también llamadas fibras OM4, han sido estandarizadas por la Organización Internacional de Normalización en el documento ISO / IEC 11801, así como en la norma TIA / EIA 492AAAD.

[0010] Sin embargo, la explosión en la demanda de ancho de banda en redes empresariales está impulsando una necesidad urgente de velocidades de red Ethernet más altas. Para aumentar aún más la tasa binaria de datos para los sistemas de 400GbE de la próxima generación, el uso de los VCSEL de In Ga As que funcionan a 40-56Gb/s entre alrededor de 1060 nm, aparece como una solución prometedora, ya que permitirá alcanzar una mayor velocidad con mayor fiabilidad, menor temperatura de funcionamiento y menor coste de los VCSEL. Además, en esta longitud de onda, la fibra exhibe menor atenuación, menor dispersión cromática y mayor ancho de banda modal potencial debido a que hay menos grupos modales si el perfil de forma alfa de índice gradual está optimizado para operar en esta longitud de onda específica.

[0011] Aunque ahora se pueden proponer tales VCSEL para aplicaciones de alta velocidad, faltan las fibras optimizadas para estos VCSEL que operen a una longitud de onda superior a 950nm.

[0012] En realidad, el experto en la técnica sabe bien que la dispersión intermodal puede reducirse adaptando el perfil en alfa y la interfaz núcleo-revestimiento a la longitud de onda de funcionamiento.

[0013] El valor alfa se puede evaluar fácilmente probando diferentes perfiles en alfa, el alfa óptimo varía monótonamente con la longitud de onda para una composición dada, sea cual sea el radio del núcleo y el índice del núcleo. Sin embargo, definir la geometría óptima para la interfaz núcleo-revestimiento es más delicado ya que no existe una relación simple entre longitud de onda y la geometría de la interfaz núcleo-revestimiento, independientemente del radio del núcleo y el índice del núcleo.

[0014] Para longitudes de onda mayores a 850 nm, debido a la menor cantidad de grupos modales, la proporción de grupos modales directamente afectados por la geometría núcleo-revestimiento es mayor. Por lo tanto, su optimización es más delicada y su impacto en el ancho de banda total aumenta. De la misma manera, con un radio de núcleo pequeño, debido a la menor cantidad de grupos modales, el impacto de la geometría núcleo-revestimiento en el ancho de banda total también aumenta.

[0015] Hasta ahora se han realizado muchos estudios para diseñar fibras de modos múltiples, cuyo ancho de banda sea suficientemente alto en un intervalo de longitud de onda relativamente grande.

[0016] El documento EP 1 503 230, a nombre de DRAKA Comteq BV, revela una fibra óptica de modos múltiples que tiene un perfil de índice de refracción, que comprende un núcleo de guía de luz rodeado por una o más capas de revestimiento. De acuerdo con este documento, las fibras ópticas de modos múltiples pueden obtenerse utilizando dos o más dopantes para construir el índice de gradiente de núcleo, en particular mediante el uso de co-dopado con flúor F y germanio GeO₂. Mediante la variación de la concentración de dopantes en el radio del núcleo, las características de dispersión intermodal de la fibra óptica de modos múltiples se pueden adaptar de tal manera que el ancho de banda sea menos dependiente de la longitud de onda.

[0017] Un inconveniente de esta técnica es que los anchos de banda logrados con tales fibras de modos múltiples y que se informan en este documento de la técnica anterior no son lo suficientemente amplios.

[0018] El documento EP 2 482 106, también a nombre de DRAKA Comteq BV, revela una fibra óptica de modos múltiples, que incluye un núcleo central que tiene un perfil de índice gradual con un valor delta de aproximadamente 1,9 por ciento o mayor. El perfil del núcleo de índice gradual tiene, al menos, dos valores de parámetro alfa diferentes a lo largo del radio del núcleo, a saber, un primer valor en una zona interna del núcleo central y un segundo valor en una zona externa del núcleo central. El segundo valor del parámetro alfa suele ser menor que el primer valor del parámetro alfa. El perfil del núcleo de índice gradual y su primera derivada suelen ser sustancialmente continuos en todo el ancho del núcleo del índice gradual.

[0019] Las fibras descritas en este documento de la técnica anterior muestran una alta apertura numérica NA con anchos de banda optimizados para una única longitud de onda a 850 nm. Además, el alto valor de NA requiere un núcleo de índice gradual con dos o más valores de α .

[0020] El documento US 7.315.677 describe fibras ópticas de modos múltiples que comprenden germanio (GeO₂) y flúor co-dopando en el núcleo de la fibra. Los perfiles de concentración de dopantes 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 pérdidas, son bajas. En algunas realizaciones, dos las ventanas operativas están disponibles para transmisión.

[0021] El documento US 7.315.677, por lo tanto, ilustra "perfiles alfa dobles" basados en co-dopado con flúor F y germanio GeO₂; cada perfil de dopante exhibe su propio alfa. Tales perfiles son difíciles de producir desde un punto de vista de proceso. En realidad, la forma de concentración de Ge y F es difícil de controlar.

[0022] El documento US 7.903.918 describe fibras ópticas resistentes a curvatura, que son de modos múltiples a 1300 nm e incluyen un núcleo, un revestimiento interior, un anillo de bajo índice y un revestimiento exterior. El

núcleo tiene un índice de refracción graduado con un perfil alfa del núcleo donde $1,9 \leq \alpha \leq 2,1$, un porcentaje de índice de refracción relativo máximo $\Delta_{1Máx}\%$ y una apertura numérica NA mayor de 0,23. El revestimiento interior rodea al núcleo y tiene un porcentaje de índice de refracción relativo máximo $\Delta_{2Max}\%$, un porcentaje de índice de refracción relativo mínimo $\Delta_{2Min}\%$ y un espesor radial de 0,5 micrómetros, en donde $\Delta_{1Max}\% > \Delta_{2Max}\%$. El anillo de índice bajo rodea el revestimiento interior y tiene un porcentaje de índice de refracción relativo $\Delta_3\%$, un grosor radial de, al menos, 0,5 micrómetros, un volumen de perfil con una magnitud absoluta mayor de $50\%-\mu\text{m}^2$, en donde $\Delta_{2Min}\% \geq \Delta_3\%$. El revestimiento exterior rodea el anillo de índice bajo y tiene un porcentaje de índice de refracción relativo del $\Delta_4\%$, de manera que $\Delta_{1Max}\% > \Delta_4\% \geq \Delta_{2Max}\%$.

[0023] Las fibras descritas en este documento muestran valores altos de NA, zanjas profundas y altos volúmenes de zanja. Y los mismos están optimizados para funcionar a 1300 nm.

[0024] El documento US 2010/0303428, revela fibras ópticas de modos múltiples resistentes a curvatura que comprenden una región central y una región de revestimiento que rodea y directamente adyacente a la región central, comprendiendo la región de revestimiento una región anular de índice deprimido; el límite interno de la región de índice deprimido es una extensión del núcleo de índice gradual, teniendo la región deprimida un volumen de foso mayor que $105\%-\mu\text{m}^2$. Tales fibras muestran zanjas profundas zanjas y altos volúmenes de zanja.

[0025] El documento US2013/0077926, revela varias realizaciones de fibras de modos múltiples, en las que se añaden zanjas para mejorar las pérdidas por curvatura. Según algunas realizaciones, una fibra óptica de modos múltiples comprende un núcleo de vidrio de índice gradual con un índice de refracción Δ_1 , un índice de refracción máximo delta Δ_{1MAX} y un radio de núcleo de entre 10 y 40 micrómetros; y la región de revestimiento que rodea el núcleo que comprende un índice de refracción Δ_4 , en el que la fibra muestra un ancho de banda saturado a una longitud de onda de funcionamiento en un rango de longitud de onda de 900 a 1250 nm superior a 2,5 GHz.km. De acuerdo con algunas realizaciones, la fibra exhibe un ancho de banda saturado en una longitud de onda entre 950 y 1100 nm, que es mayor que 4 GHz.km. De acuerdo con algunas realizaciones, la fibra exhibe un ancho de banda saturado en una longitud de onda entre 950 y 1100 nm, que es mayor que 10 GHz.km. Los volúmenes de las zanjas descritos en este documento son muy grandes. Además, los perfiles revelados son bastante complejos de diseñar.

[0026] El documento US2013/0039626 también describe fibras de modos múltiples en las que se añade una zanja en el revestimiento, con el fin de mejorar los comportamientos a curvatura de la fibra de modos múltiples. La fibra óptica de modos múltiples descrita incluye un núcleo de vidrio de índice gradual que tiene un diámetro en el rango de 24 micrómetros a 40 micrómetros, un índice gradual que tiene un perfil alfa inferior a 2,12 y un índice de refracción relativo máximo en el rango de entre 0,6% y 1,9%. La fibra también incluye un revestimiento rodeando y en contacto con el núcleo. El revestimiento incluye una parte anular de índice deprimido. Además, la fibra tiene un ancho de banda saturado superior a 2,0 GHz-km a 1310nm.

[0027] Los volúmenes de las zanjas descritos en este documento son muy grandes. La zanja se añade para mejorar el rendimiento a curvatura de las MMF con pequeño diámetro de núcleo.

[0028] En vista de lo anterior, sería deseable diseñar una fibra óptica de modos múltiples adaptada a aplicaciones de alta velocidad (sistemas de próxima generación de 400GbE con VCSEL transmitiendo a 25 Gb/s o más) y que muestre mejoras con respecto a la técnica anterior.

[0029] Más precisamente, sería deseable diseñar una fibra óptica de modos múltiples de este tipo, que mostrara un ancho de banda OFL superior a 10000MHz.km a una longitud de onda de funcionamiento de entre 950 nm y 1310 nm.

[0030] Otra fibra de modos múltiples que comprende una zanja añadida en el revestimiento se describe en el documento US2012328255. También sería deseable diseñar fibras ópticas de modos múltiples con geometría de revestimiento-núcleo optimizada de acuerdo con el número de grupos de modos soportados por la MMF en la longitud de onda de funcionamiento.

Sumario

[0031] En una realización particular de la invención, se propone una fibra óptica de modos múltiples, que comprende un núcleo central rodeado por un revestimiento óptico externo, teniendo dicho núcleo central (i) un radio exterior R_1 , (ii) un índice de refracción máximo n_1 , (iii) un índice de refracción mínimo n_0 , y (iv) un perfil de índice gradual $n(r)$ que es función de la distancia radial r desde el centro de dicho núcleo central. El perfil de índice gradual del núcleo central $n(r)$ se define mediante la siguiente ecuación:

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{R_1}\right)^\alpha}$$

donde:

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

y estando α comprendida entre 1,96 y 2,05, siendo α un parámetro adimensional que es indicativo de la forma del perfil de índice, con n_0 y n_1 en una longitud de onda de funcionamiento λ , teniendo dicho núcleo central un valor N de entre 7 y 52, donde N se define por la siguiente ecuación:

$$N = \left(\frac{R_1}{\lambda}\right)^2 (n_1^2 - n_0^2),$$

con la longitud de onda de funcionamiento λ tal que $\lambda \geq 950\text{nm}$.

[0032] Además, dicho revestimiento óptico comprende una región de índice de refracción deprimido n_2 , llamada zanja, que rodea el núcleo óptico, teniendo dicha zanja un radio interior R_1 , un radio exterior R_2 , con $R_2 > R_1$, una diferencia de índice de refracción $Dn_2 = (n_2 - n_{cl}) \times 1000$ con respecto a dicho revestimiento óptico que tiene en su borde exterior un índice de refracción n_{cl} , con n_2 y n_{cl} a la longitud de onda de funcionamiento λ , y un volumen $V_2 = \pi(R_2^2 - R_1^2) \times Dn_2$, y satisfaciendo dicha zanja los criterios:

$$-2.20 < Dn_2 < 0.0$$

$$220 \times \ln(N) - 1100 < V_2 < 220 \times \ln(N) - 865.$$

[0033] La presente invención se basa así en un enfoque nuevo e inventivo de las fibras ópticas de modos múltiples. En realidad, propone una fibra óptica de modos múltiples adaptada a aplicaciones de alta velocidad que utilizan VCSEL emitiendo luz por encima de 950 nm (preferiblemente entre 950 y 1310 nm), con una geometría de revestimiento de núcleo optimizada de acuerdo con el número de grupos de modos soportados por la MMF en la longitud de onda de funcionamiento.

[0034] De hecho, una fibra óptica de modos múltiples según las formas de realización de la invención se adapta a una longitud de onda de funcionamiento igual o superior a 950 nm, y se diseña optimizando la geometría núcleo-

$$N = \left(\frac{R_1}{\lambda}\right)^2 (n_1^2 - n_0^2),$$

revestimiento de acuerdo con el criterio que es proporcional al número de modos soportados por la MMF. Con una pequeña zanja directamente adyacente al núcleo de la diferencia de índice Dn_2 y del volumen V_2 que satisface $-2,20 < Dn_2 < 0,0$ y $220 \times \ln(N) - 1100 < V_2 < 220 \times \ln(N) - 865$, las realizaciones de la invención permiten diseñar las MMF fácilmente con ancho de banda OFL grande en una longitud de onda superior a 950nm.

[0035] De acuerdo con otro aspecto de la presente invención, dicho núcleo central tiene una abertura numérica $NA = \sqrt{(n_1^2 - n_0^2)}$ de entre 0,185 y 0,215 a 633 nm.

[0036] De acuerdo con un aspecto de la presente invención, dicho radio de núcleo exterior R_1 está comprendido entre 15 y 40 μm .

[0037] De acuerdo con otro aspecto de la presente invención, dicha longitud de onda de funcionamiento λ está entre 950 nm y 1310 nm.

[0038] Según otro aspecto de la presente invención, dicha longitud de onda de funcionamiento es preferentemente de alrededor de 1060 nm.

[0039] Según aún otro aspecto, para al menos una longitud de onda comprendida entre 950 nm y 1310 nm, dicha fibra óptica de modos múltiples tiene un ancho de banda de inyección saturada (BW-OFL) superior a 10000MHz.km.

[0040] La presente invención se refiere además a un sistema óptico de modos múltiples que comprende, al menos, una porción de una fibra óptica de modos múltiples como se describió anteriormente. Dicho sistema óptico de modos múltiples comprende un transmisor, un receptor y una fibra óptica de modos múltiples como se describió anteriormente. Dicho sistema es preferiblemente un sistema de comunicación óptica de múltiples canales, mientras que la presente invención también se refiere a un sistema de comunicación óptica de un solo canal.

Breve descripción de los dibujos

[0041] 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 un perfil de índice de refracción para un ejemplo de una fibra óptica de acuerdo con una realización de la invención;

- La figura 2, muestra el rango del volumen de la zanja V_{trench} para una fibra óptica de acuerdo con realizaciones de la invención, en función de N, para obtener una BW-OFL a más de 10000MHz.km;

- La figura 3, ilustra el valor medio del retardo de tiempo por grupo de modo para varias MMF, una de las cuales cumple con los requisitos de la invención, mientras que las otras no lo hacen.

[0042] Los componentes de las figuras no están necesariamente a escala, sino que se hace hincapié en la ilustración de los principios de la invención.

Descripción detallada

[0043] A lo largo de este documento, los términos de longitud de onda de funcionamiento designan la longitud de onda entregada por la fuente de luz del VCSEL utilizado (VCSEL con luz transmitida a 25 Gb/s o más en una o más longitudes de onda entre 950 y 1310 nm).

5 **[0044]** Además, debe recordarse que el ancho de banda de inyección saturada BW-OFL es el procedimiento de medición de ancho de banda de fibra originalmente estandarizado en el que la fuente emite luz de manera uniforme en todos los modos de la fibra de modos múltiples. Al inyectarse de manera uniforme en todos los grupos de modos, esta medida es sensible a la interfaz núcleo/revestimiento de la fibra y permite diferenciar la interfaz núcleo/revestimiento optimizada de las no optimizadas.

10 **[0045]** La fibra de modos múltiples según una realización de la invención comprende un núcleo central rodeado por un revestimiento óptico exterior. El núcleo central tiene (i) un radio exterior R_1 , (ii) un índice de refracción máximo n_1 , (iii) un índice de refracción mínimo n_0 y (iv) un perfil de índice gradual $n(r)$ que es una función de la distancia radial r desde el centro de dicho núcleo central. El índice de refracción mínimo n_0 del núcleo central también corresponde generalmente al índice del revestimiento (con mayor frecuencia en sílice).

15 **[0046]** El núcleo y el revestimiento forman la porción de vidrio de la fibra óptica. En algunas realizaciones, el revestimiento está recubierto con uno o más recubrimientos, por ejemplo con un polímero de acrilato.

[0047] La figura 1 muestra una forma de perfil de índice de refracción de una fibra de modos múltiples según una realización de la invención, expresada como la diferencia del índice de refracción Dn en función del radio. Como se puede observar, el núcleo central de radio exterior R_1 muestra que un perfil de índice gradual $n(r)$ se define mediante la siguiente ecuación:

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{R_1}\right)^\alpha}$$

20 $\Delta = \frac{(n_1^2 - n_0^2)}{2n_1^2}$ donde Δ y estando comprendida α entre 1,96 y 2,05.

[0048] El núcleo está rodeado por un revestimiento óptico, que comprende una capa interna de índice de refracción deprimido que rodea directamente el núcleo. Dicha trinchera tiene un radio interno R_1 y un radio externo R_2 , y muestra una diferencia de índice de refracción Dn_2 .

25 **[0049]** Las realizaciones de la invención permiten diseñar las MMF que funcionan a una longitud de onda mayor de 850 nm, preferentemente entre 950 y 1.310 nm, y preferentemente alrededor de 1060 nm. Para optimizar el ancho de banda de la MMF, el volumen V_{trench} (también llamado V_2 en el presente documento) y la diferencia de índice de refracción Dn_2 de la zanja ubicada en la interfaz núcleo-revestimiento se designan conforme al criterio $N = \left(\frac{R_1}{\lambda}\right)^2 (n_1^2 - n_0^2)$ proporcional al número de modos guiados por la MMF en la longitud de onda de funcionamiento λ .

[0050] El volumen de la zanja V_{trench} se puede expresar como $V_2 = \pi(R_2^2 - R_1^2) \times Dn_2$ (en $10^{-3} \mu\text{m}^2$), con $Dn_2 = (n_2 - n_{\text{cl}}) \times 1000$ (en 10^{-3}) y n_2 el índice de refracción mínimo de la zanja en la longitud de onda de funcionamiento.

35 **[0051]** Para α entre 1,96 y 2,05, R_1 entre 15 y 40 μm , $NA = \sqrt{(n_1^2 - n_0^2)}$ entre 0,185 y 0,215 a 633 nm y $\lambda \geq 950$ nm,

- Dn_2 debe satisfacer: $-2,2 < Dn_2 < 0,0$ y
- V_{trench} debe satisfacer: $220 \times \ln(N) - 1100 < V_{\text{trench}} < 220 \times \ln(N) - 865$, para tener fibras con BW-OFL $> 10000 \text{MHz.km}$.

[0052] La tabla 1 a continuación describe algunos ejemplos (Ej. 1 a Ej. 17) de fibras ópticas de modos múltiples según realizaciones de la invención, que muestran una forma de perfil según la figura 1.

40

Tabla 1

Ejemplo	Longitud de onda de funcionamiento (nm)	Alfa (@633nm)	NA (μm)	R1 (μm)	R2 (μm)	Dn2 (10^{-3})	Vtrench ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	n1	nref	N	BW-OFL (MHz.km)
Ej. 1	1060	2,02	0,193	23	25,35	-0,84	-300	1,4623	1,4499	17	19489
Ej. 2	1060	2,02	0,185	23	25,50	-1,03	-391	1,4613	1,4499	16	16251
Ej. 3	1060	2,02	0,205	23	25,00	-1,00	-295	1,4638	1,4499	19	10249
Ej. 4	1060	2,02	0,193	25	27,40	-0,71	-281	1,4623	1,4499	20	18150
Ej. 5	1060	2,02	0,185	25	27,11	-0,98	-339	1,4613	1,4499	18	18423
Ej. 6	950	2,04	0,193	25	26,92	-0,71	-223	1,4637	1,4513	25	18495
Ej. 7	1310	1,98	0,193	25	28,38	-0,88	-500	1,4594	1,4471	13	12991
Ej. 8	1060	2,02	0,205	27	29,50	-0,76	-317	1,4638	1,4499	26	10993
Ej. 9	1060	2,02	0,193	27	28,64	-0,74	-211	1,4623	1,4499	23	17388
Ej. 10	1060	2,02	0,185	27	29,11	-0,85	-316	1,4613	1,4499	21	18389
Ej. 11	1060	2,02	0,2	32	34,50	-0,53	-275	1,4632	1,4499	35	11847
Ej. 12	1060	2,02	0,185	32	33,09	-0,86	-193	1,4613	1,4499	30	19929
Ej. 13	1060	2,02	0,185	35	35,66	-1,08	-158	1,4613	1,4499	36	17697

Ej. 14	1060	2,02	0,2	38	40,32	-0,19	-1,07	1,4632	1,4499	50	12374
Ej. 15	1060	2,02	0,185	38	40,49	-0,15	-93	1,4613	1,4499	42	22264
Ej. 16	1060	2,02	0,215	15	17,96	-1,42	-435	1,4652	1,4499	9	11568
Ej. 17	1060	2,02	0,185	15	19,00	-1,42	-606	1,4613	1,4499	7	12723

5 **[0053]** Los ejemplos 1, 2 y 3 de la tabla 1 describen tres MMF optimizados para tener un ancho de banda máximo alrededor de una longitud de onda de funcionamiento $\lambda = 1060\text{nm}$ con un radio de núcleo de $R_1 = 23 \mu\text{m}$ y una apertura numérica NA que varía de 0,185 (ejemplo 2) a 0,205 (ejemplo 3). El criterio N, que es proporcional al número de modos soportados por la MMF, varía de 16 (ejemplo 2) a 19 (ejemplo 3). La diferencia del índice de zanja (Dn_2) y el volumen de zanja V_{trench} se han elegido para limitar el efecto del revestimiento (es decir, para limitar el aumento de la velocidad de grupo de los últimos grupos de modo) para obtener una BW-OFL mayor de 10000MHz.km. El ancho de banda de inyección saturada BW-OFL alcanza así 19489 MHz.km para la MMF del ejemplo 1, 16251 MHz.km por ejemplo, para el ejemplo 2 y 10249MHz.km por ejemplo, para el ejemplo 3.

10 **[0054]** Los ejemplos 4 a 17 de la tabla 1 describen otros ejemplos de fibras de modos múltiples según realizaciones de la invención con radios centrales R_1 que varían de 15 a 38 μm , apertura numérica NA que varía de 0,185 a 0,215 y una longitud de onda de funcionamiento que varía de 950 nm (ejemplo 6) a 1310nm (ejemplo 7). Puede observarse que cuanto más pequeño sea el criterio N, más sensible será a las variaciones de N el volumen de la zanja en la interfaz núcleo/revestimiento.

15 **[0055]** Cuando el radio del núcleo R_1 se reduce fuertemente hasta 15 μm (ver ejemplos 16 y 17), el número de modos soportados por la fibra se reduce, especialmente cuando la longitud de onda de funcionamiento se desplaza a 950 nm y más. En tales condiciones, el criterio N está por debajo de 10 y el impacto de la geometría del núcleo/revestimiento en el ancho de banda total aumenta. Los ejemplos 16 y 17 representan algunas MMF con radios de núcleo iguales a 15 μm , con $V_{\text{trench}} = -435 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ y $V_{\text{trench}} = -606 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ respectivamente pero exhibiendo una BW-OFL mayor de 10000MHz.km. En realidad, la fibra óptica de modos múltiples del ejemplo 16 muestra un ancho de banda de inyección saturada BW-OFL = 11568MHz.km, y la fibra óptica de modos múltiples del ejemplo 17 muestra un ancho de banda de inyección saturada BW-OFL = 12723MHz.km.

25 **[0056]** La tabla 2 a continuación presenta algunos ejemplos comparativos que, al contrario de los ejemplos en la tabla 1 anterior, están fuera del alcance de la presente invención.

Tabla 2

Ejemplo	Longitud de onda de funcionamiento (nm)	Alfa (@633nm)	NA (μm)	R1 (μm)	R2 (μm)	Dn2 (10^{-3})	Vtrench ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	n1	nref	N	BW-OFL (MHz.km)
Ej. 1c	1060	2,02	0,193	23	23,75	-0,98	-108	1,4638	1,4499	19	7863
Ej. 2c	1060	2,02	0,185	23	24,00	-2,94	-434	1,4638	1,4499	19	2325
Ej. 3c	1060	2,02	0,205	23	24,75	-2,94	-772	1,4638	1,4499	19	1786
Ej. 4c	1060	2,02	0,193	25	26,90	-1,47	-455	1,4638	1,4499	23	5416
Ej. 5c	1060	2,02	0,185	32	33,30	-1,47	-392	1,4652	1,4499	41	5187
Ej. 6c	1060	2,02	0,193	32	32,80	0,49	80	1,4652	1,4499	41	6548
Ej. 7c	1060	2,02	0,193	15	18,90	-1,96	-814	1,4648	1,4499	9	3227
Ej. 8c	1060	2,02	0,205	15	16,50	-2,45	-364	1,4648	1,4499	9	3511
Ej. 9c	1060	2,02	0,193	15	19,50	-1,47	-717	1,4613	1,4499	9	7692

30 **[0057]** La figura 2 representa el rango del volumen de la zanja V_{trench} para una fibra óptica de acuerdo con realizaciones de la invención, expresada en $10^{-3} \mu\text{m}^2$, en función del criterio N, para obtener una BW-OFL mayor de 10000MHz.km. Las líneas discontinuas muestran los límites inferior y superior del volumen de la zanja V_{trench} en función de N, para fibras ópticas de modos múltiples con alfa comprendido entre 1,96 y 2,05, radio del núcleo R_1 comprendido entre 15 y 40 μm y apertura numérica NA comprendida entre 0,185 y 0,215, cualquiera que sea la longitud de onda de funcionamiento $\lambda \geq 950\text{nm}$.

35 **[0058]** Además, los ejemplos 1 a 17 de las fibras ópticas de modos múltiples enumeradas en la tabla 1 se agregaron en forma de puntos negros en la figura 2. Como se puede observar, todos los puntos negros correspondientes están comprendidos entre los límites inferior y superior de V_{trench} , como todos los ejemplos de la tabla 1 cumpla el criterio: $220 \times \ln(N) - 1100 < V_{\text{trench}} < 220 \times \ln(N) - 865$.

40 **[0059]** Los ejemplos comparativos, 1c a 9c de la tabla 2 también se han trazado en la figura 2, como triángulos. La mayoría de los triángulos caen fuera del rango de volúmenes permitidos V_{trench} , excepto en los ejemplos comparativos, 2c y 8c. Sin embargo, las fibras ópticas de modos múltiples de ejemplos comparativos 2c y 8c también están fuera del alcance de las realizaciones de la invención, ya que exhiben una diferencia de índice de refracción de la zanja $Dn_2 < -2.2 \times 10^{-3}$.

45 **[0060]** Como se puede observar en la tabla 2, los ejemplos comparativos 1c, 2c y 3c muestran la misma apertura numérica NA = 0,205, el mismo alfa $\alpha = 2,02$ y el mismo radio del núcleo $R_1 = 23 \mu\text{m}$ (y por lo tanto, el mismo valor del criterio N = 19) que el ejemplo 3 de la tabla 1. Sin embargo, las tres fibras ópticas de modos múltiples de los ejemplos 1c, 2c y 3c tienen prestaciones de ancho de banda más bajo que el ejemplo 3.

[0061] Se recuerda que los grupos de modo de orden bajo viajan cerca del centro del núcleo, mientras que los grupos de modo de orden superior viajan más cerca de la interfaz de núcleo-revestimiento. Para reducir la dispersión modal DMD y, por lo tanto, aumentar el ancho de banda de la fibra óptica, la diferencia en los retardos de tiempo de los grupos de modos que viajan a través de la fibra debe ser lo más pequeña posible. El diseño cuidadoso del volumen de la zanja, de acuerdo con las realizaciones de la invención, permite modificar los retardos de tiempo de los grupos de modos cerca de la interfaz núcleo-revestimiento.

[0062] Las dimensiones de la zanja del ejemplo 3 (es decir, el volumen de la zanja y el índice de la zanja) se han elegido para minimizar el efecto de la interfaz núcleo/revestimiento. Como se puede observar en la figura 3, que muestra el valor de la media del retardo de tiempo (expresado en ps/m) por grupo de modo (expresado en número de grupo de modo), por ejemplo, en el ejemplo 3 de la tabla 1 y los ejemplos comparativos 1c, 2c y 3c de la tabla 2, solo el último grupo de modos del ejemplo 3 tiene un retardo de tiempo muy reducido en comparación con los otros grupos de modos.

[0063] El ejemplo comparativo 1c tiene un volumen de zanja más pequeño ($V_{\text{trench}} = -108$) que el ejemplo 3 ($V_{\text{trench}} = -295$) (en absoluto valor). Los retardos de tiempo de los tres últimos grupos de modo (es decir, de alto orden) (es decir, grupos de modo n° 11, n° 12 y n° 13) se reducen considerablemente en comparación con los grupos de modo de orden más bajo.

[0064] Como consecuencia del pequeño volumen de zanja V_{trench} del ejemplo comparativo 1c, y por lo tanto de los retardos de tiempo muy reducidos de los tres últimos grupos de modos, la BW-OFL de la fibra óptica de modos múltiples del ejemplo comparativo 1c está por debajo de 10000MHz.km.

[0065] El ejemplo comparativo 2c tiene un volumen de zanja ($V_{\text{trench}} = -434$ (en $10^{-3}\mu\text{m}^2$)) suficiente para compensar la interfaz núcleo/revestimiento. Pero el índice de zanja es demasiado bajo ($Dn_2 = -2.94$) y no cumple con el criterio establecido en las realizaciones de la invención ($-2.2 < Dn_2 < 0.0$). Aunque la diferencia de retardo de tiempo del último grupo de modos (grupo de modos n° 13) se reduce considerablemente, en comparación con los ejemplos comparativos 3c y 1c, los últimos cuatro grupos de modos (es decir, grupos de modos n° 10, n° 11, n° 12 y n° 13) están todos perturbados por la zanja. Por lo tanto, aunque la diferencia en los retardos de tiempo entre los grupos de modos no es tan alta, la gran cantidad de grupos de modos influenciados por la zanja tiene un impacto negativo en el ancho de banda, por lo que el ancho de banda de inyección saturada BW-OFL se reduce a aproximadamente 2300MHz.km.

[0066] En el ejemplo comparativo 3c, tanto el volumen de la zanja como la profundidad de la zanja son demasiado grandes. En realidad, como puede leerse en la tabla 2, $V_{\text{trench}} = -772$ (en $10^{-3}\mu\text{m}^2$) y $Dn_2 = -2.94$ (en 10^{-3}). Como consecuencia, los últimos cuatro grupos de modos (es decir, los grupos de modos n° 10, n° 11, n° 12 y n° 13) están demasiado perturbados por la zanja y la BW-OFL se reduce aún más a aproximadamente 1700MHz.km.

[0067] Los ejemplos comparativos 4c, 5c y 6c representan algunas MMF con radios centrales iguales a $25\mu\text{m}$ (ejemplo 4c) y $32\mu\text{m}$ (ejemplos 5c y 6c). Con respecto a los ejemplos comparativos 4c y 5c, el volumen de la zanja es demasiado grande según el criterio N: los triángulos correspondientes representados en la figura 2 están por debajo del límite inferior establecido para V_{trench} . Respecto al ejemplo comparativo 6c, el volumen de la zanja es demasiado pequeño según el criterio N: el triángulo correspondiente trazado en la figura 2 está por encima del límite superior establecido para V_{trench} .

[0068] Los ejemplos comparativos 7c, 8c y 9c representan algunas MMF con radios de núcleo igual a $15\mu\text{m}$ también. Con respecto a los ejemplos comparativos 7c y 9c, el volumen de la zanja es demasiado grande según el criterio N: los triángulos correspondientes representados en la figura 2 están por debajo del límite inferior establecido para V_{trench} . Respecto al ejemplo comparativo 8c, aunque el volumen de la zanja cumple el criterio $220 \times \ln(N) - 1100 < V_{\text{trench}} < 220 \times \ln(N) - 865$, la diferencia del índice de refracción Dn_2 de la zanja es demasiado bajo ($Dn_2 = -2.45$ (en 10^{-3})).

[0069] Los criterios establecidos en las realizaciones de la invención permiten aumentar el ancho de banda OFL de una fibra de modos múltiples a más de 10000MHz.km a una longitud de onda de funcionamiento entre 950nm y 1310nm. La relación $220 \times \ln(N) - 1100 < V_{\text{trench}} < 220 \times \ln(N) - 865$ que vincula los valores mínimos y máximos aceptables para el volumen de la zanja V_{trench} con el parámetro N permite diseñar fácilmente el volumen óptimo de la zanja y definir la óptima geometría núcleo-revestimiento, cualquiera que sea el tamaño del núcleo y la longitud de onda de funcionamiento.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Fibra óptica de modos múltiples que comprende un núcleo central rodeado por un revestimiento óptico exterior, teniendo dicho núcleo central,
 (i) un radio exterior R_1 , (ii) un índice de refracción máximo n_1 , (iii) un índice de refracción mínimo n_0 , y (iv) un perfil de índice gradual $n(r)$ que es función de la distancia radia r desde el centro de dicho núcleo central, estando definido dicho perfil de índice gradual $n(r)$ mediante la siguiente ecuación:

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{R_1}\right)^\alpha}$$

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

y estando comprendido α entre 1,96 y 2,05 siendo α un parámetro adimensional que es indicativo de la forma del perfil de índice, con n_0 y n_1 en una longitud de onda de funcionamiento λ , teniendo dicho núcleo central un valor N comprendido entre 7 y 52, donde N está definido por la siguiente ecuación;

15
$$N = \left(\frac{R_1}{\lambda}\right)^2 (n_1^2 - n_0^2),$$

con la longitud de onda de funcionamiento λ tal que $\lambda \geq 950\text{nm}$

en la que dicho revestimiento óptico comprende una región de índice de refracción deprimido n_2 , llamada zanja, que rodea el núcleo óptico, teniendo dicha zanja un radio interior R_1 , un radio exterior $R_2 > R_1$, una diferencia de índice de refracción $Dn_2 = (n_2 - n_{cl}) \times 1000$ respecto de dicho revestimiento óptico teniendo en su borde exterior un índice de refracción n_{cl} , con n_2 y n_{cl} en la longitud de onda de funcionamiento λ , y un

volumen $V_2 = \pi(R_2^2 - R_1^2) \times Dn_2,$

- 20 y donde dicha zanja satisface el criterio:

$$-2.20 < Dn_2 < 0.0$$

- 25 y

$$220 \times \ln(N) - 1100 < V_2 < 220 \times \ln(N) - 865.$$

2. Fibra óptica de modos múltiples de acuerdo con la reivindicación 1, en la que dicho núcleo central tiene una
 30 apertura numérica $NA = \sqrt{(n_1^2 - n_0^2)}$ comprendida entre 0,185 y 0,215 a 633 nm.

3. Fibra óptica de modos múltiples de acuerdo con las reivindicaciones 1 y 2, en la que dicho radio exterior de núcleo R_1 está comprendido entre 15 y 40 μm .

- 35 4. Fibra óptica de modos múltiples de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en la que dicha longitud de onda de funcionamiento λ se encuentra comprendida entre 950 nm y 1310 nm.

5. Fibra óptica de modos múltiples de acuerdo con la reivindicación 4, en la que dicha longitud de onda de funcionamiento λ es preferentemente de aproximadamente 1060 nm.

- 40 6. Fibra óptica de modos múltiples de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en la que para al menos una longitud de onda comprendida entre 950 nm y 1310 nm, dicha fibra óptica de modos múltiples tiene un ancho de banda de inyección saturada (BW-OFL) mayor de 10000 MHz.km.

- 45 7. Sistema óptico de modos múltiples que comprende al menos una porción de una fibra óptica de modos múltiples según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6.

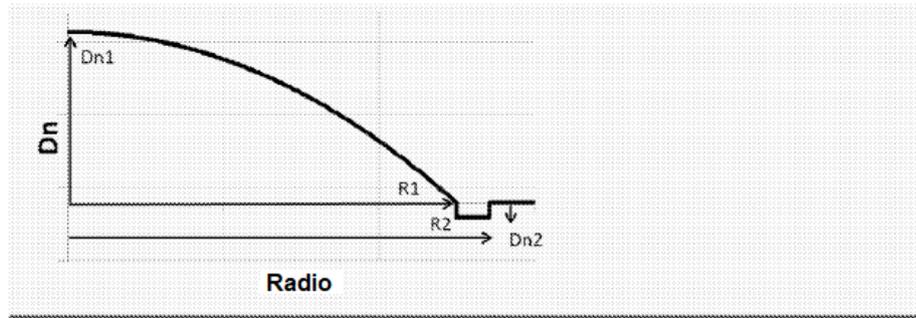


Fig. 1

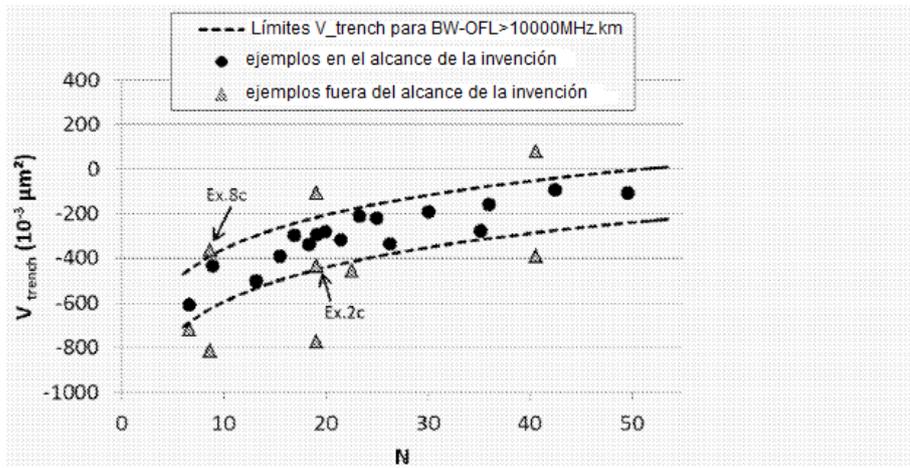


Fig. 2

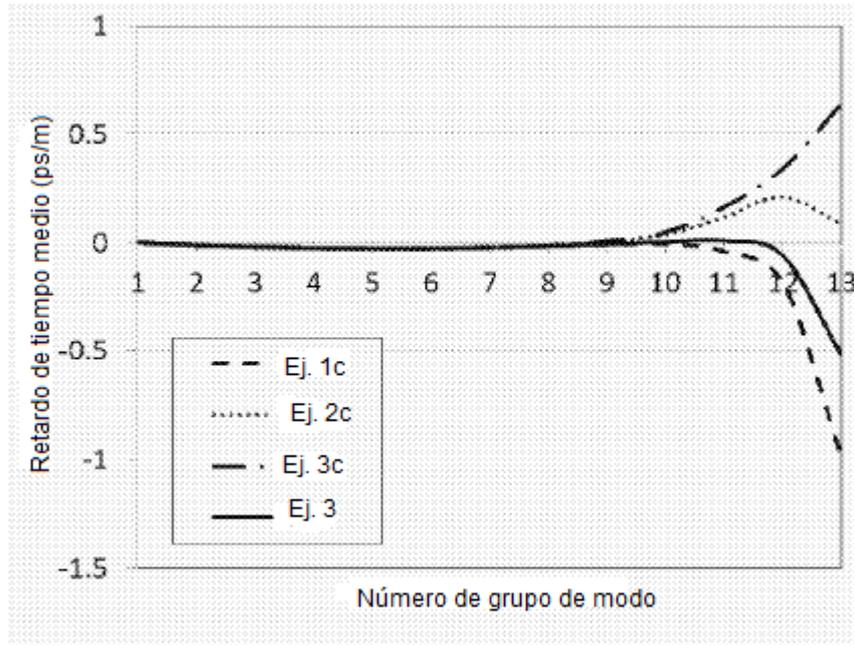


Fig. 3

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

- EP 1503230 A [0016]
- EP 2482106 A [0018]
- US 7315677 B [0020] [0021]
- US 7903918 B [0022]
- US 20100303428 A [0024]
- US 20130077926 A [0025]
- US 20130039626 A [0026]
- US 2012328255 A [0030]

10