

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 659 373**

51 Int. Cl.:

G02B 6/028 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.09.2010 E 10176645 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.12.2017 EP 2299303**

54 Título: **Fibra óptica de modos múltiples con pérdidas por curvatura reducidas**

30 Prioridad:

17.09.2009 FR 0904447
18.09.2009 US 243626 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
15.03.2018

73 Titular/es:

DRAKA COMTEQ B.V. (100.0%)
De Boelelaan 7
1083 HJ Amsterdam, NL

72 Inventor/es:

MOLIN, DENIS;
SILLARD, PIERRE y
LUMINEAU, YVES

74 Agente/Representante:

ARPE FERNÁNDEZ, Manuel

ES 2 659 373 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 pérdidas por curvatura reducidas

5 **[0001]** La presente invención se refiere al campo de las transmisiones por fibra óptica, y más específicamente, a una fibra óptica de modos múltiples que tiene pérdidas por curvatura muy reducidas para su utilización en aplicaciones de alta velocidad.

10 **[0002]** De manera estándar, una fibra óptica está compuesta de un núcleo óptico que tiene la función de transmitir y opcionalmente amplificar una señal óptica, y un revestimiento óptico exterior que tiene la función de confinar la señal óptica dentro del núcleo óptico. Con este fin, los índices de refracción del núcleo óptico n_{core} y del revestimiento óptico exterior n_{cladding} son tales que $n_{\text{core}} > n_{\text{cladding}}$. En la siguiente descripción, donde se mencione "núcleo" de la fibra óptica, se entiende el núcleo óptico, a menos que se indique lo contrario; y cuando se mencione "revestimiento" de la fibra óptica, se entenderá el revestimiento óptico externo, a menos que se indique lo contrario; y donde se indique "fibra" significará fibra óptica, a menos que se establezca lo contrario o que resulte claro por el contexto.

15 **[0003]** El perfil de índice de refracción de una fibra indica el gráfico que asocia el índice de refracción con el radio de la fibra. De manera estándar, la distancia al centro de la fibra se muestra en el eje x, y mostrándose en el eje y, la diferencia entre el índice de refracción de la fibra para el radio r y el índice de refracción del revestimiento de la fibra. Generalmente, el perfil de índice de refracción se califica según su apariencia. De esta manera, el perfil del índice se describe en términos de "escalón", "trapezoidal", "triángulo" o "alfa" para los gráficos que respectivamente tienen formas escalonada, trapezoidal, triangular o gradual (α). Estas curvas son representativas del perfil teórico o establecido de la fibra, mientras que las limitaciones de fabricación de la fibra pueden dar como resultado un perfil ligeramente diferente.

20 **[0004]** Existen dos tipos principales de fibra óptica, fibras de modos múltiples y fibras de modo único. En una fibra de modos múltiples, para una longitud de onda dada, varios modos ópticos se propagan simultáneamente a lo largo de la fibra, mientras que en una fibra óptica de modo único, los modos ópticos de orden superior son fuertemente atenuados. El diámetro típico de una fibra óptica de modo único o de modos múltiples es de 125 μm . El núcleo de una fibra de modos múltiples tiene típicamente un diámetro de 50 μm o 62,5 μm , mientras que el núcleo de una fibra de modo único generalmente tiene un diámetro de aproximadamente 6 μm a 9 μm . Los sistemas ópticos de modos múltiples son menos costosos que los sistemas ópticos de modo único, ya que las fuentes, los conectores y el mantenimiento son de menor costo.

25 **[0005]** Ahora, en una fibra de modos múltiples, el ancho de banda está vinculado a la dispersión intermodal. De hecho, el ancho de banda es el resultado de la diferencia entre los tiempos de propagación, o los tiempos de retardo de grupo de los modos ópticos a lo largo de la fibra. En particular, para el mismo medio de propagación (en una fibra de modos múltiples de índice en escalón), los diferentes modos tienen tiempos de retardo de grupo que son diferentes. Esto da como resultado un retraso temporal entre los impulsos que se propagan en diferentes direcciones radiales. Un retraso temporal entre los pulsos individuales provoca un ensanchamiento del impulso de luz resultante con el riesgo de que este ensanchamiento se superponga a un impulso siguiente y, por lo tanto, reduzca la tasa de datos soportada por la fibra. Por lo tanto, el ancho de banda está directamente relacionado con el tiempo de retardo de grupo de los modos ópticos que se propagan en el núcleo de modos múltiples de la fibra. Para garantizar un ancho de banda amplio, es necesario que los tiempos de retardo de grupo de todos los modos sean idénticos; es decir, para que la dispersión intermodal sea cero, o al menos minimizarse, para una longitud de onda dada.

35 **[0006]** Con el fin de reducir la dispersión intermodal en una fibra de modos múltiples, se ha propuesto fabricar fibras de índice gradual con un perfil de núcleo "alfa" o " α ". Tal fibra se ha utilizado durante muchos años y sus características se han descrito en particular en "Multimode theory of graded-core fibres" por D. Gloge y otros, Bell System Technical Journal 1973, páginas. 1563-1578, y resumidas en "Comprehensive theory of dispersion in graded-index optical fibers" por G. Yabre, Journal of Lightwave Technology, febrero de 2000, vol. 18, N^o. 2, páginas 166 a 177.

40 **[0007]** Una fibra que tiene un perfil de índice gradual o un perfil de índice alfa - estos dos términos son equivalentes - es una fibra con un núcleo de índice gradual rodeado por un revestimiento con un índice óptico constante. El perfil de índice α sigue una ley exponencial para el parámetro α que se puede definir por una relación entre el valor índice n para un determinado punto como una función de la distancia r desde dicho punto hasta el centro de la fibra:

55

$$n(r) = n_{\text{max}} \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{r_1}\right)^\alpha}$$

60 con $\alpha \geq 1$; siendo n_{max} , el índice óptico máximo del núcleo de la fibra de modos múltiples; r_1 , el radio del núcleo de la fibra de modos múltiples; y

$$\Delta = \frac{(n_{\max}^2 - n_{\min}^2)}{2n_{\max}^2}$$

donde n_{\min} es el índice de refracción mínimo del núcleo de modos múltiples, generalmente correspondiente al índice de refracción del revestimiento (más a menudo hecho de sílice natural o sintética dopada o sin dopar).

[0008] Una fibra de modos múltiples de índice gradual tiene, por lo tanto, un perfil de núcleo con una simetría de revolución tal que, en cualquier dirección radial, el valor del índice de refracción disminuye continuamente desde el centro de la fibra hasta su periferia. Cuando una señal de luz de modos múltiples se propaga por dicho núcleo que tiene un índice gradual, los diferentes modos experimentan un medio de propagación diferente, que afecta su velocidad de propagación de manera diferente. Mediante un ajuste del valor del parámetro α , es posible obtener un tiempo de retardo de grupo que es prácticamente igual para todos los modos y, por lo tanto, una dispersión intermodal reducida. Esto da como resultado fibras de modos múltiples, que tienen un perfil de índice α como el perfil de índice de refracción, con un ancho de banda máximo para la comunicación de datos.

[0009] En lo sucesivo, por la expresión "fibra de índice gradual estándar" se entiende una fibra con un perfil de índice óptico α que satisface estándares internacionales y de manera que el índice de refracción óptico mínimo del núcleo y el índice de refracción del revestimiento son iguales. En tal situación, la diferencia entre el índice óptico mínimo del núcleo y el índice de refracción del revestimiento es estrictamente inferior a 1×10^{-3} , o incluso nulo. Las fibras de modos múltiples han sido objeto de normalización internacional según la norma ITU-T G.651.1, que en particular define criterios para anchos de banda, apertura numérica, diámetro del núcleo que se relacionan con los requisitos de compatibilidad entre fibras. El estándar OM3 se ha adoptado para satisfacer aplicaciones de alta velocidad (mayor de 1 GbE) para largas distancias (más de 300 m). Con el desarrollo de aplicaciones de alta velocidad, el diámetro medio del núcleo se ha reducido de 62,5 μm a 50 μm .

[0010] Dichas fibras de modos múltiples con un gran ancho de banda están destinadas en particular a ser utilizadas para distancias cortas en una red de área local (LAN) en la que podrían estar sometidas a curvatura accidental. Tales curvaturas modifican la distribución de potencia de modo y, en consecuencia, pueden modificar el ancho de banda de la fibra.

[0011] Por lo tanto, sería interesante diseñar una fibra de modos múltiples que no se vea afectada por curvaturas, incluso para radios de curvatura menores de 10 mm. Una fibra tal debe ser compatible con las fibras de índice gradual estándar y permitir una transmisión de alta velocidad de 10 Gb/s en sistemas de 10 GbE, por ejemplo (GbE para Gigabit Ethernet).

[0012] Una solución a tal problema podría consistir en ajustar las condiciones para inyección de la luz que se origina desde una fuente de luz en la fibra considerada. Como todos los modos se ven afectados de forma diferente por las curvaturas, sería suficiente modificar las condiciones de inyección de modo que los únicos modos en los que existe un acoplamiento con la luz inyectada sean modos no afectados por curvaturas.

[0013] Sin embargo, en la práctica, la fuente y el dispositivo de acoplamiento entre la fuente y la fibra imponen condiciones de lanzamiento que impiden el ajuste de las condiciones de inyección.

[0014] Además, restringir el acoplamiento a los modos de orden más bajo implica una pérdida de eficacia de acoplamiento de potencia.

[0015] Tal fenómeno puede ir acompañado de un aumento en el repercusión del ruido de partición de modo sobre la luz transmitida en la fibra. El aumento aparece cuando se usan fuentes láser en combinación con la fibra y, en particular, si se utilizan diodos VCSEL (láser de emisión superficial de cavidad vertical) que permiten una transmisión de 10 GbE. El ruido de la partición de modo corresponde a la "fluctuación" de la fase de la señal debido a los efectos combinados de cambiar el modo principal de la fuente óptica ("modo de saltos") y las distorsiones intramodales en la fibra. El cambio del modo principal es un salto repentino en la frecuencia óptica de la fuente óptica, asociado con las transiciones entre los diferentes modos del resonador. Por lo tanto, el cambio del modo principal de la fuente óptica conduce a modificaciones aleatorias en la longitud de onda que afectan la velocidad de grupo y, por tanto, al tiempo de propagación. Sobre la longitud de la fibra, el efecto acumulativo de esta variación de la velocidad de grupo es inducir fluctuación de fase, es decir, ruido de partición de modo.

[0016] El documento EP 1164393 A1 de Asahi Glass Company Ltd. describe una fibra óptica plástica. La publicación de Jacomme L. en Applied Optics USA, vol. 14, nº 11 de 1 de noviembre de 1975, páginas 2578 a 2584, describe dispersión modal en fibras de índice gradual de modos múltiples. El documento JP-A-2002 318315 de Sumitomo Electric Industries, describe una fibra óptica. El documento EP 2056138 A1, divulga una fibra de sílice de índice gradual de modos múltiples. El documento US 4 176 911 discute las pérdidas por curvatura y el ruido en fibras de modos múltiples de índice gradual con una discontinuidad de índice de refracción entre el núcleo y el revestimiento. También es conocido aplicar curvaturas adicionales a la fibra de modos múltiples. Así, a partir del documento EP 1727302 A, se conoce una red de acceso con una fibra de modos múltiples en la que parte de la fibra de modos múltiples se encuentra curvada. Esto da como resultado una reducción en pérdidas de transmisión debido a una curvatura en la red restante. De la misma manera que para la solución mencionada anteriormente de modificar las condiciones de inyección, la aplicación de curvaturas adicionales a una fibra de modos múltiples también puede inducir pérdidas en la eficiencia de acoplamiento de potencia con, si corresponde, un aumento en la repercusión del ruido de partición de modo cuando se utilizan VCSELS (láseres de emisión superficial de cavidad vertical) que permiten una transmisión de 10 GbE.

[0017] Otra solución es una arquitectura de fibra dedicada, es decir, un perfil de índice óptico específico. Se sabe que se reducen las pérdidas por curvatura de una fibra de modos múltiples de índice gradual al agregar una zanja deprimida entre el núcleo y el revestimiento. Los documentos WO-A-2008085851 y US-A-20080166094, describen así un núcleo de índice gradual rodeado por una zanja deprimida. La resistencia a pérdidas por curvatura de la fibra de índice gradual es así aumentada.

[0018] Dicha solución plantea varios problemas, en particular con respecto a la fabricación. Típicamente, el núcleo central, es decir, el núcleo "alfa", el revestimiento y parte del revestimiento de protección exterior se obtienen por deposición química en fase de vapor (CVD) sobre un tubo de sílice. El revestimiento o el revestimiento de protección exterior, está constituido por el tubo y sobre-revestimiento del tubo generalmente con sílice natural dopada. El sobre-revestimiento puede obtenerse mediante cualquier otra técnica de deposición (VAD u OVD). Sin embargo, la realización de las soluciones de los documentos WO-A-2008085851 y US-A-20080166094, requiere una zona de deposición en el exterior, que no es óptima desde el punto de vista del costo de las técnicas de deposición química en fase de vapor. De hecho, esto conduce a la producción de una menor longitud de fibra por barra de núcleo.

[0019] Además, la adición de una zanja deprimida da como resultado la aparición de modos de propagación suplementarios conocidos como modos de fuga. Los modos de fuga tienen índices de refracción efectivos que son más bajos que los de los modos guiados. Esto conduce a un aumento en la apertura numérica en las fibras de índice gradual que comprende una zanja deprimida, en comparación con las fibras de índice gradual sin zanja deprimida. Tal diferencia en la apertura numérica puede conducir a pérdidas durante las conexiones dentro de un sistema que comprende fibras de índice gradual con zanja deprimida y fibras de índice gradual sin zanja deprimida.

[0020] Por lo tanto, existe la necesidad de una fibra de índice gradual que tenga pérdidas por curvatura reducidas con pérdidas de acoplamiento a una fibra estándar de índice gradual que esté más limitada que en el estado de la técnica.

[0021] Para este fin, la invención propone una fibra óptica de modos múltiples a base de sílice que comprende un revestimiento óptico exterior, con un índice óptico n_{cladding} y un núcleo central que tiene un radio r_1 y un perfil de índice óptico con un índice gradual de parámetro α , también llamado un perfil de índice óptico α con índice gradual. El índice óptico máximo del núcleo es n_{max} y siendo el índice óptico mínimo del núcleo n_{min} . La fibra es tal que se satisfacen las relaciones $2 \times 10^{-3} < n_{\text{min}} - n_{\text{cladding}} \leq 5 \times 10^{-3}$ y $n_{\text{max}} - n_{\text{min}} > 10 \times 10^{-3}$ y exhibe pérdidas por curvatura menores de 0,1 dB por dos vueltas con un radio de curvatura de 15 mm. El revestimiento óptico exterior está en contacto directo con el núcleo.

[0022] De acuerdo con la presente invención, el revestimiento óptico exterior rodea directamente el núcleo "alfa". De acuerdo con la presente invención, el radio del núcleo central r_1 está comprendido entre 22 μm y 28 μm . La presente invención se refiere a fibras ópticas a base de sílice.

[0023] De acuerdo con otro ejemplo de realización, el parámetro α está comprendido entre 1,9 y 2,2, preferiblemente entre 1,9 y 2,1 y más ventajosamente entre 2,0 y 2,1.

[0024] Según otro ejemplo de realización, la apertura numérica (NA) de la fibra definida por

$$NA = \sqrt{n_{\text{max}}^2 - n_{\text{min}}^2}, \text{ es mayor de 0,18.}$$

[0025] Según otro ejemplo de realización, la apertura numérica (NA) de la fibra definida por

$$NA = \sqrt{n_{\text{max}}^2 - n_{\text{min}}^2}, \text{ es menor de 0,29.}$$

[0026] Dicha fibra se puede usar en una red de área local (LAN).

[0027] La invención también propone un sistema de transmisión óptica que comprende, al menos, una porción de dicha fibra óptica.

[0028] De acuerdo con una realización, el sistema tiene una tasa de datos mayor o igual a 10 Gb/s hasta 100 m.

[0029] Según otra realización, el sistema tiene una tasa de datos mayor o igual a 10 Gb/s hasta 300 m.

[0030] Un sistema de este tipo se puede usar en una red de área local (LAN).

[0031] Otras características y ventajas de la invención se pondrán de manifiesto a partir de la lectura de la siguiente descripción detallada de las realizaciones de la invención, dada a modo de ejemplo solamente y con referencia a los dibujos que muestran:

- Figura 1, un gráfico de pérdidas por curvatura de una fibra como una función de la diferencia del índice de refracción efectivo a una longitud de onda de 1300 nm;

- Figura 2, un gráfico de pérdidas por curvatura de una fibra como una función de la diferencia del índice de refracción efectivo a una longitud de onda de 850 nm;

- Figura 3, un perfil de índice de un ejemplo de una fibra de acuerdo con la invención.

- Figura 4, un gráfico del desarrollo de las pérdidas por curvatura para dos vueltas como una función del radio de curvatura de la curvatura impuesta a una fibra;

- Figura 5, un perfil de índice de una fibra estándar de índice gradual y los modos que se propagan en la fibra;

- Figura 6, un perfil de índice de un ejemplo de una fibra de índice gradual de acuerdo con la invención y los modos que se propagan en la fibra;

- Figura 7, un gráfico de la eficacia de acoplamiento entre los grupos de modo de la fibra de índice gradual estándar y los grupos de modo de la fibra de índice gradual de acuerdo con el ejemplo de la figura 3;
- Figura 8, un gráfico de la eficacia de acoplamiento entre los grupos de modo de la fibra de índice gradual estándar y los grupos de modos de la fibra del índice gradual de acuerdo con el ejemplo de la figura 3;
- Figura 9, un gráfico mostrando los retardos de propagación de los modos como una función del número de modo principal para una fibra de índice gradual estándar y
- Figura 10, un gráfico que muestra los retardos de propagación de los modos como una función del número de modo principal para una fibra de índice gradual de modos múltiples según la invención.

[0032] Se sabe que las pérdidas por curvatura para los modos de una fibra de modos múltiples dependen principalmente del índice de modo efectivo. Esto se ilustra en particular en las figuras 1 y 2 que son gráficos de pérdidas por curvatura de una fibra en función de la diferencia de índice efectivo del modo considerado respectivamente a 1300 nm y 850 nm. La diferencia de índice efectivo es la diferencia entre el índice de refracción efectivo del modo y el índice de refracción del revestimiento. Cada uno de los dos experimentos se lleva a cabo para dos aperturas numéricas (ON) de la fibra: 0,2 y 0,185 y un radio de curvatura para la curvatura impuesta sobre la fibra de 15 mm. En los ejemplos de las figuras 2 y 3, los modos afectados por curvatura tienen una diferencia de índice efectiva de 4×10^{-3} . El grado en que se ve afectada una fibra de modos múltiples está, por lo tanto, directamente unido con la relación entre el número de modos no afectados por curvaturas y el número total de modos.

[0033] La idea que subyace en la presente invención consiste en aumentar el índice de refracción efectivo de los modos guiados, cuyos modos también existen en la fibra de modos múltiples de índice gradual estándar. Para este propósito, se propone una arquitectura de fibra de modos múltiples específica que no se ve afectada por las pérdidas por curvatura para transmisión de datos a alta velocidad (típicamente 10 GbE).

[0034] Dicha arquitectura se muestra en la figura 3. La figura 3 es un perfil de índice de refracción de un ejemplo de una fibra de acuerdo con la invención. La fibra comprende un revestimiento óptico exterior cuyo índice óptico es sustancialmente constante en todo el ancho del revestimiento óptico. El índice óptico del revestimiento se indica con n_{cladding} . La fibra también comprende un núcleo con un radio r_1 , estando el revestimiento en contacto directo con el núcleo. Esto significa que la arquitectura de la figura 3 no presenta zanjas. El núcleo de la fibra según el ejemplo de la figura 3 tiene un radio típico de una fibra de modos múltiples. El radio del núcleo está comprendido entre 22 μm y 28 μm , y preferiblemente 25 μm .

[0035] El núcleo tiene un perfil de índice óptico alfa con respecto al revestimiento óptico exterior como se definió previamente. El parámetro alfa puede estar comprendido entre 1,9 y 2,2, preferiblemente entre 1,9 y 2,1 y aún más ventajosamente entre 2,0 y 2,1. El índice óptico máximo del núcleo se indica como n_{max} y el índice óptico mínimo del núcleo se indica como n_{min} . La fibra es tal que la diferencia entre el índice óptico máximo del núcleo y el índice óptico mínimo del núcleo es mayor que 10×10^{-3} , que se expresa mediante la relación $n_{\text{max}} - n_{\text{min}} > 10 \times 10^{-3}$.

[0036] La fibra se caracteriza por el hecho de que el índice óptico mínimo del núcleo es estrictamente mayor que el índice del revestimiento. Esto se puede expresar matemáticamente por el hecho de que la diferencia entre el índice óptico mínimo del núcleo y el índice del revestimiento es una cantidad estrictamente positiva, lo que significa que $n_{\text{min}} - n_{\text{cladding}} > 0$. Esto significa que hay una perceptible disminución discontinua en el índice de refracción en el valor de $r = r_1$, que va desde un valor de índice de refracción de n_{min} hasta un valor de índice de refracción de n_{cladding} . Esta disminución controla la dispersión modal, cuya dispersión modal debe ser controlada para garantizar la compatibilidad de ancho de banda modal con comunicación de datos. La interfaz entre el núcleo y el revestimiento se define por esta disminución discontinua en el índice de refracción. El revestimiento rodea directamente el núcleo sin la presencia de un revestimiento intermedio o una zanja deprimida.

[0037] Respecto de una fibra de índice gradual estándar, la fibra de acuerdo con la invención conforme al ejemplo de la figura 3, difiere en que el índice de refracción del núcleo de índice gradual es creciente con respecto al índice óptico del revestimiento. La fibra de acuerdo con la invención de acuerdo con el ejemplo de la figura 3 tiene así la ventaja de tener pérdidas por curvatura reducidas. Tal fibra es además compatible con las fibras de índice gradual estándar. Las ventajas de la fibra de acuerdo con el ejemplo de la figura 3 se explican con mayor detalle a continuación.

[0038] La reducción en las pérdidas por curvatura se hace más evidente al considerar la figura 4. La figura 4 es un gráfico en una escala semi-logarítmica que muestra el desarrollo de las pérdidas por curvatura para dos vueltas en función del radio de curvatura de la curva impuesta sobre la fibra para una longitud de onda de 850 nm. El desarrollo está representado por diferentes valores de la diferencia entre el índice óptico mínimo del núcleo y el índice del revestimiento, es decir, 0 (la fibra es entonces una fibra estándar de índice gradual), $1 \cdot 10^{-3}$, $2 \cdot 10^{-3}$, $3 \cdot 10^{-3}$, $4 \cdot 10^{-3}$ y $5 \cdot 10^{-3}$.

[0039] Las fibras ópticas de modos múltiples utilizadas para el experimento de la figura 2 tienen todas una apertura numérica efectiva de 0,2. La apertura numérica efectiva NA de una fibra se define por la expresión:

$$NA = \sqrt{n_{\text{eff,max}}^2 - n_{\text{eff,min}}^2}$$

donde $n_{\text{eff,min}}$ y $n_{\text{eff,max}}$ son, respectivamente, los índices de refracción efectivos mínimo y máximo de los modos comprendidos en la señal medida a la salida de fibra en condiciones OFL (lanzamiento sobresaturado). En tales condiciones, la excitación de la señal en la entrada de fibra es uniforme en todos los modos de propagación. Esto supone la utilización de una fuente de luz que presenta una excitación uniforme sobre toda la superficie radial de la fibra, por ejemplo un diodo láser o LED (diodo emisor de luz).

[0040] Sin embargo, se obtiene una buena aproximación de la apertura numérica efectiva con la raíz cuadrada de la diferencia de los cuadrados de los índices de refracción del núcleo de la fibra. Esto también se puede escribir en forma de relación:

$$NA = \sqrt{n_{\max}^2 - n_{\min}^2}$$

donde n_{\max} y n_{\min} son respectivamente los índices de refracción máximo y mínimo del perfil de la fibra. En adelante se utilizará la fórmula aproximada.

[0041] Para el caso de una fibra estándar de índice gradual, la apertura numérica efectiva de una fibra de modos múltiples con un núcleo de radio de 25 μm asciende a 0,2, mientras que la apertura numérica efectiva para una fibra de modos múltiples que tiene un núcleo de radio de 31,25 μm asciende a 0,275.

[0042] En el experimento de la figura 4, todos los modos guiados en la fibra tienen un índice efectivo mayor que n_{\min} y también son excitados. Como se explica a continuación durante la descripción de un sistema con una porción de fibra de acuerdo con el ejemplo de la figura 3, esto es posible acoplando la fibra según el ejemplo de la figura 3 con una fibra de modos múltiples de índice gradual estándar bajo condiciones de OFL o con una fuente cuya apertura numérica es menor que la apertura numérica efectiva de la fibra de acuerdo con el ejemplo de la figura 3.

[0043] Para una apertura numérica efectiva constante, cuanto mayor es la diferencia entre el índice óptico mínimo del núcleo y el índice del revestimiento de la fibra, mayor es la reducción en las pérdidas por curvatura para la fibra. A modo ilustrativo, para un radio de curvatura de 10 mm, las pérdidas por curvatura para una fibra de acuerdo con la invención se reducen en aproximadamente un 30% con respecto a una fibra estándar de índice gradual. Esto muestra que la fibra de acuerdo con la invención exhibe pérdidas por curvatura reducidas con respecto a una fibra de índice gradual estándar.

[0044] El efecto de reducción de las pérdidas por curvatura es aún más marcado para las fibras de acuerdo con la invención en las que $n_{\min} - n_{\text{cladding}}$, es 4×10^{-3} o 5×10^{-3} para las cuales las reducciones de pérdidas por curvatura respecto de una fibra estándar con índice gradual, son de, al menos, el 73% o el 90%.

[0045] Por lo tanto, aumentando el valor de la diferencia entre el índice de refracción óptico mínimo del núcleo y el índice de refracción del revestimiento con una apertura numérica efectiva constante se reduce el grado en que la fibra se ve afectada por las curvaturas. Por lo tanto, puede ser ventajoso que la diferencia entre el índice de refracción óptico mínimo del núcleo y el índice de refracción del revestimiento sea estrictamente mayor de 2×10^{-3} . En tal caso, la fibra puede exhibir pérdidas por curvatura menores de 0,1 dB para dos vueltas para un radio de curvatura de 15 mm.

[0046] Dicha fibra está destinada a ser utilizada en un sistema de transmisión óptica. Por lo tanto, es interesante estudiar la compatibilidad de la fibra de modos múltiples de acuerdo con la invención como se representa en el ejemplo de la figura 3 con una fibra de índice gradual estándar como se definió previamente.

[0047] Sin embargo, el aumento de la diferencia del índice de refracción para la fibra de acuerdo con el ejemplo de la figura 3 generalmente conduce a mayores pérdidas lineales, en particular debido al aumento en la difusión y/o absorción de Rayleigh. Además, la dispersión cromática de la fibra de acuerdo con la figura 3 puede ser mayor que para una fibra de índice gradual estándar. Además, la apertura numérica de la fibra de la figura 3 es mayor que el valor máximo permitido. La apertura numérica de la fibra según el ejemplo de la figura 3 puede ser, en particular, mayor que 0,18. La apertura numérica también puede ser inferior a 0,29. Las dos condiciones pueden cumplirse además por la misma fibra según el ejemplo de la figura 3, en cuyo caso la apertura numérica está comprendida entre 0,18 y 0,29.

[0048] La fibra de la figura 3 por lo tanto no cumple las condiciones de los estándares. Esto significa que se permiten modos adicionales mediante el perfil de índice de refracción de la fibra según el ejemplo de la figura 3, modos que no existen en la fibra de índice gradual estándar. La comparación de las figuras 5 y 6 permite ilustrar este hecho.

[0049] La figura 5 muestra el perfil de índice de una fibra estándar de índice gradual. Como se explicó anteriormente, este es un perfil α . El eje x inferior muestra el radio de la fibra, y el eje y por la izquierda muestra el índice de refracción de la fibra estándar de índice gradual. El perfil de índice de refracción con respecto al revestimiento está representado por una línea continua negra. El gráfico también muestra los modos que se propagan en la fibra por medio de puntos. El eje y a la derecha muestra los índices de refracción efectivos relativos de los modos de propagación, es decir, la diferencia entre el índice de refracción efectivo del modo y el índice de refracción del revestimiento. Una referencia llamada índice azimutal, que se muestra en el eje x, parte superior, corresponde a cada modo. Este índice también se llama número de modo principal. Normalmente, los modos se colocan en grupos de modos visibles en una dirección horizontal del gráfico. Por ejemplo, la fibra mostrada comprende 18 grupos de modo.

[0050] La figura 6 muestra un gráfico similar a la figura 5 para una fibra de acuerdo con el ejemplo de la figura 3. Así el eje x inferiormente muestra de manera similar el radio de la fibra, y el eje y a la izquierda muestra el índice de refracción de la fibra de acuerdo con el ejemplo de la figura 3. La fibra según el ejemplo de la figura 3 tiene el mismo perfil que la fibra de índice gradual estándar con un valor para la diferencia entre el índice mínimo del núcleo y el revestimiento que asciende a 10×10^3 . El gráfico también muestra los modos que se propagan en la fibra. El eje y a la derecha muestra los índices de refracción efectivos relativos de los modos de propagación. Una referencia llamada índice azimutal, que se muestra en el eje x superiormente, corresponde a cada modo. La fibra mostrada comprende 33 grupos de modo. El número de modos en la fibra de acuerdo con el ejemplo de la figura 3, es por lo tanto mayor que el número de modos en una fibra de índice gradual estándar.

[0051] Sin embargo, entre estos 33 grupos de modo, solo 18 grupos de modo tienen un índice efectivo mayor que el índice óptico mínimo del núcleo. Estos son los modos que están situados por encima de la línea de puntos de la figura 6. Los 18 modos de orden inferior de la fibra de acuerdo con el ejemplo de la figura 3 son tan numerosos como los de la fibra de índice gradual estándar. Los 18 modos tienen un índice efectivo superior a los 18 modos de la correspondiente fibra estándar de índice gradual que explica su mejor resistencia a pérdidas por curvatura.

[0052] Sin embargo, los 18 modos tienen el mismo índice acimutal y, en consecuencia, la misma forma. Por lo tanto, los modos de una fibra estándar de índice gradual existen en una fibra de acuerdo con el ejemplo de la figura 3. Como de ello resultó, cuando la fibra según el ejemplo de la figura 3 se acopla con una fibra estándar de índice gradual, cada modo guiado de la fibra de índice gradual estándar está acoplado con solo un modo (el más próximo desde el punto de vista de forma) y, por lo tanto, cada grupo de modo de la fibra de índice gradual estándar está acoplado solo al mismo grupo de modo en la fibra según el ejemplo de la figura 3. Los modos de orden superior de la fibra de acuerdo con el ejemplo de la figura 3 que no existen en la fibra de índice gradual estándar, no se excitan porque son ortogonales a todos los modos guiados de la fibra de índice gradual estándar. Esto se pone de manifiesto en particular mediante el análisis de los gráficos de las figuras 7 y 8.

[0053] Las figuras 7 y 8 ilustran gráficamente la eficacia del acoplamiento entre los 18 grupos de modo de la fibra de índice gradual estándar y los 33 grupos de modo de la fibra de acuerdo con el ejemplo de la figura 3. Las dos fibras utilizadas son las mismas que fibras usadas para las figuras 5 y 6. Se utiliza una escala de grises, un acoplamiento de 1 correspondiente a un acoplamiento ideal, sin pérdidas entre la fibra estándar de índice gradual y la fibra según el ejemplo de la figura 3 y correspondiendo un acoplamiento 0 una ausencia de acoplamiento. La figura 7 se produce bajo condiciones en las que las dos fibras están perfectamente centradas mutuamente, mientras que en el caso de la figura 8, las fibras están desplazadas 3 mm una con respecto a la otra. Como se indicó anteriormente, un grupo de modo de la fibra de índice gradual estándar tiene el mejor acoplamiento con el grupo de modo de la fibra que tiene el mismo número de modo principal ya sea en la configuración de alineación perfecta (figura 7) o desplazada (figura 8). Como resultado de ello, los grupos de modo con un número de modo principal mayor de 18 no pueden ser excitados por una fibra estándar de índice gradual. De este modo se muestra que en la fibra estándar de índice gradual no puede excitar modos adicionales generados en la fibra de acuerdo con el ejemplo de la figura 3 debido al aumento global del índice de refracción del núcleo. Una fibra de acuerdo con el ejemplo de la figura 3 es por lo tanto compatible en combinación con una fibra estándar de índice gradual que tiene el mismo perfil α . Esto significa que una conexión entre una fibra de acuerdo con el ejemplo de la figura 3 y una fibra de índice gradual estándar no mezcla ni filtra los modos de propagación. Por lo tanto, una fibra según el ejemplo de la figura 3 exhibe un acoplamiento muy bueno con una fibra estándar de índice gradual.

[0054] A partir de esta observación, se deduce que el sistema de transmisión puede comprender además una fuente de luz con una apertura numérica menor que la apertura numérica de una fibra de índice gradual estándar. Si dicha fuente está centrada en términos de posición y angularmente, la luz que se origina en la fuente se inyectará en los modos guiados que son compatibles con los modos de la fibra de índice gradual estándar, lo que significa que los modos excitados tendrán un índice efectivo comprendido entre los índices extremos del núcleo de la fibra, es decir, n_{\min} y n_{\max} .

[0055] Cuando sea preferible usar una fuente de modo que la apertura numérica sea menor que la apertura numérica de una fibra de índice gradual estándar, se generan modos adicionales. Entonces es posible diseñar un cable específico y/o aplicar curvaturas adicionales como se describe en el documento EP-A-1 727 302 para eliminar solo los modos adicionales creados.

[0056] Las figuras 9 y 10 son gráficos que ilustran respectivamente los tiempos de propagación para los grupos de modo de la fibra de índice gradual estándar utilizada para las figuras 5 y 7 y de la fibra según el ejemplo de la figura 3 usada para las figuras 6 y 8. Las dispersiones modales observadas son similares. Por lo tanto, las fibras de acuerdo con el ejemplo de la figura 3 tienen la misma capacidad para soportar transmisiones a una tasa binaria mayor que las fibras de índice gradual estándar.

[0057] La fibra de acuerdo con el ejemplo de la figura 3, es por lo tanto una fibra de índice gradual que exhibe pérdidas por curvatura reducidas con pérdidas de acoplamiento a una fibra estándar de índice gradual que son más limitadas que en el estado de la técnica. La capacidad de manipulación de la fibra está, en particular, muy mejorada gracias a su excepcional insensibilidad a las pérdidas por curvatura.

[0058] La fibra de la figura 3 también es compatible con una transmisión a alta velocidad. El sistema permite así obtener transmisiones sin errores para una tasa de datos mayor o igual a 10 Gb/s (10 GbE) para una distancia significativa, hasta, por ejemplo, 100 m o 300 m.

[0059] Las fibras ópticas de acuerdo con la presente invención se pueden fabricar por estirado a partir de preformas finales.

[0060] Se puede fabricar una preforma final proporcionando una preforma primaria con una capa exterior de sobre-revestimiento (es decir, un proceso de sobre-revestimiento). La capa exterior de sobre-revestimiento está compuesta por vidrio de sílice dopado o sin dopar, natural o sintética. Varios métodos están disponibles para proporcionar la capa exterior de sobre-revestimiento.

[0061] En un primer ejemplo de procedimiento, la capa exterior de sobre-revestimiento puede proporcionarse depositando y vitrificando partículas de sílice naturales o sintéticas sobre la periferia exterior de la preforma primaria bajo la influencia de calentamiento. Tal proceso es conocido, por ejemplo, a partir de las patentes de Estados Unidos números 5.522.007, 5.194.714, 6.269.663 y 6.202.447.

[0062] En otro ejemplo de procedimiento, una preforma primaria puede sobre revestirse utilizando un tubo de camisa de sílice, que puede o no estar dopado. Este tubo de camisa puede colapsarse sobre la preforma primaria.

[0063] En otro ejemplo más de procedimiento, se puede aplicar una capa de sobre-revestimiento a través de un procedimiento de deposición externa en fase de vapor (OVD). Aquí, primero se deposita una capa de hollín sobre la periferia exterior de una preforma primaria, y luego esta capa de hollín se vitrifica para formar vidrio.

[0064] Las preformas primarias se pueden fabricar mediante técnicas de deposición externa en fase de vapor, tales como deposición externa en fase de vapor (OVD) y deposición axial en fase de vapor (VAD). Alternativamente, las preformas primarias pueden fabricarse mediante técnicas de deposición interna en las que se depositan capas de vidrio sobre la superficie interior de un tubo de sustrato de vidrio de sílice dopado o sin dopar, tales como deposición química en fase de vapor modificada (MCVD), deposición química en fase de vapor en horno (FCVD) y deposición química en fase de vapor asistida por plasma (PCVD).

[0065] En un ejemplo de una realización, las preformas primarias se fabrican usando un proceso de PCVD, que permite que la forma del perfil de índice de refracción del gradiente del núcleo central se controle de forma muy precisa.

[0066] La zanja deprimida puede depositarse sobre la superficie interna de un tubo de sustrato como parte del proceso de deposición química en fase de vapor. Más típicamente, la zanja deprimida se puede fabricar ya sea (i) utilizando un tubo de sustrato dopado con flúor como punto de partida del proceso de deposición interna para la deposición del núcleo central de índice de refracción de gradiente o (ii) encamisando un tubo de sílice dopada con flúor sobre el núcleo central de índice de refracción de gradiente, que a su vez puede producirse utilizando un proceso de deposición externa (por ejemplo, OVD o VAD).

[0067] En otro ejemplo más de una realización, una preforma primaria se fabrica mediante un proceso de deposición interna usando un tubo de sustrato dopado con flúor. El tubo resultante que contiene las capas depositadas puede enfundarse con uno o más tubos de sílice dopados con flúor adicionales para aumentar el grosor de la zanja deprimida o para crear una zanja deprimida que tenga un índice de refracción variable a través de su anchura. Aunque no se requiere, uno o más tubos de funda adicionales (por ejemplo, tubos de sustrato dopados con flúor) pueden colapsarse sobre la preforma primaria antes de llevar a cabo una etapa de sobre-revestimiento. El proceso de enfundado y colapsado a veces se denomina encamisado y se puede repetir para construir varias capas de vidrio en el exterior de la preforma primaria.

[0068] Por supuesto, la presente invención no está limitada a las realizaciones descritas a modo de ejemplo. La fibra de acuerdo con la invención se puede instalar en numerosos sistemas de transmisión que tienen buena compatibilidad con las otras fibras del sistema. La fibra de modos múltiples de acuerdo con la invención se puede usar en un sistema óptico Ethernet con un ancho de banda mejorado. La fibra también se puede utilizar en una red de área local (LAN).

[0069] La presente invención se refiere en las reivindicaciones que siguen.

REIVINDICACIONES

1. Fibra óptica de modos múltiples a base de sílice que comprende desde el centro hasta la periferia un núcleo óptico y un revestimiento óptico exterior que está en contacto directo con el núcleo óptico, teniendo dicho revestimiento óptico exterior un índice de refracción definido como n_{cladding}
- 5 - en la que el núcleo óptico tiene un radio (r_1) que está comprendido entre 22 μm y 28 μm y un perfil de índice de refracción α con un índice gradual respecto del revestimiento óptico exterior;
- en la que el índice de refracción máximo del núcleo óptico está definido por n_{max} y el índice de refracción mínimo de núcleo óptico está definido por n_{min}
- 10 - en la que el perfil de índice α sigue una ley exponencial para el parámetro α dada por:

$$n(r) = n_{\text{max}} \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{r_1}\right)^\alpha}$$

con $\alpha \geq 1$

15

$$\Delta = \frac{(n_{\text{max}}^2 - n_{\text{min}}^2)}{2n_{\text{max}}^2}$$

- en la que $n_{\text{max}} - n_{\text{min}} > 10 \times 10^{-3}$
- donde la fibra presenta pérdidas por curvatura inferiores a 0,1 dB para dos vueltas con radio de curvatura de 15 mm,
- 20 caracterizada porque $2 \times 10^{-3} < n_{\text{min}} - n_{\text{cladding}} \leq 5 \times 10^{-3}$

2. Fibra de acuerdo con la reivindicación 1, en la que el parámetro α del perfil de índice de refracción del núcleo está comprendido entre 1,9 y 2,2, preferiblemente entre 1,9 y 2,1 y más ventajosamente entre 2,0 y 2,1.
- 25

3. Fibra de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 y 2, en la cual la apertura numérica NA de la fibra definida por

$$NA = \sqrt{n_{\text{max}}^2 - n_{\text{min}}^2}$$

es mayor que 0,18.

4. Fibra de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 3, en la cual la apertura numérica NA de la fibra definida por
- 30

$$NA = \sqrt{n_{\text{max}}^2 - n_{\text{min}}^2}$$

es menor que 0,29.

5. Sistema de transmisión óptica que comprende, al menos, una porción de una fibra óptica de modos múltiples de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4.
- 35

6. Sistema de acuerdo con la reivindicación 5 que presenta una tasa de datos mayor o igual a 10 Gb/s hasta 100 m.

7. Sistema de acuerdo con la reivindicación 5 que presenta una tasa de datos mayor o igual a 10 Gb/s hasta 300 m.
- 40

8. Utilización de una fibra óptica de modos múltiples de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4 en una red de área local (LAN).
- 45

9. Utilización del sistema de transmisión óptica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 5 a 7 en una red de área local (LAN).

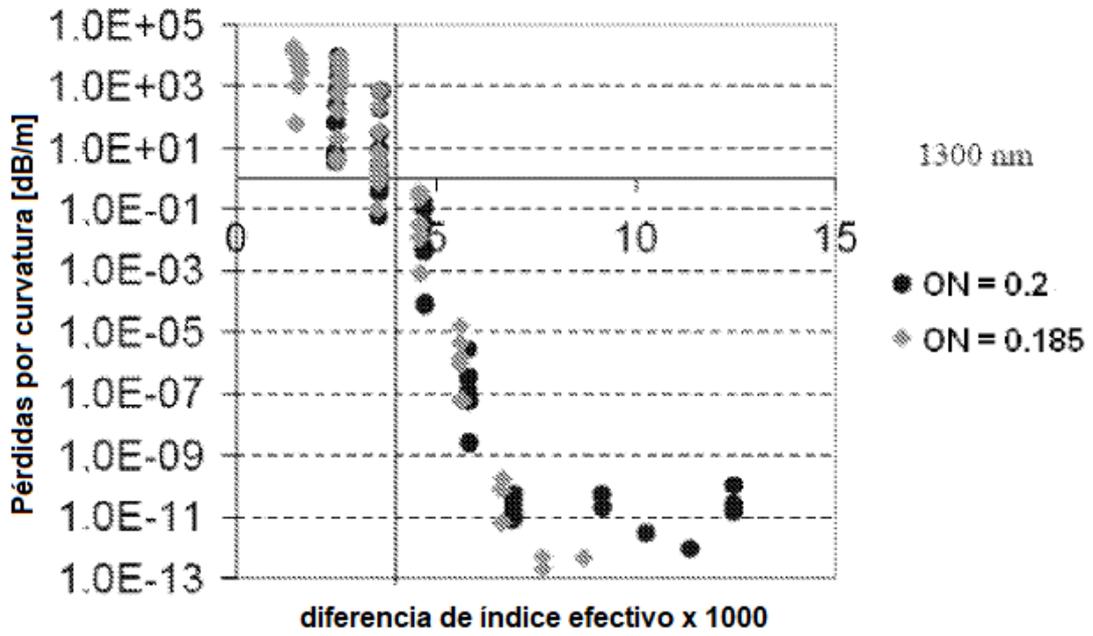


Figura 1

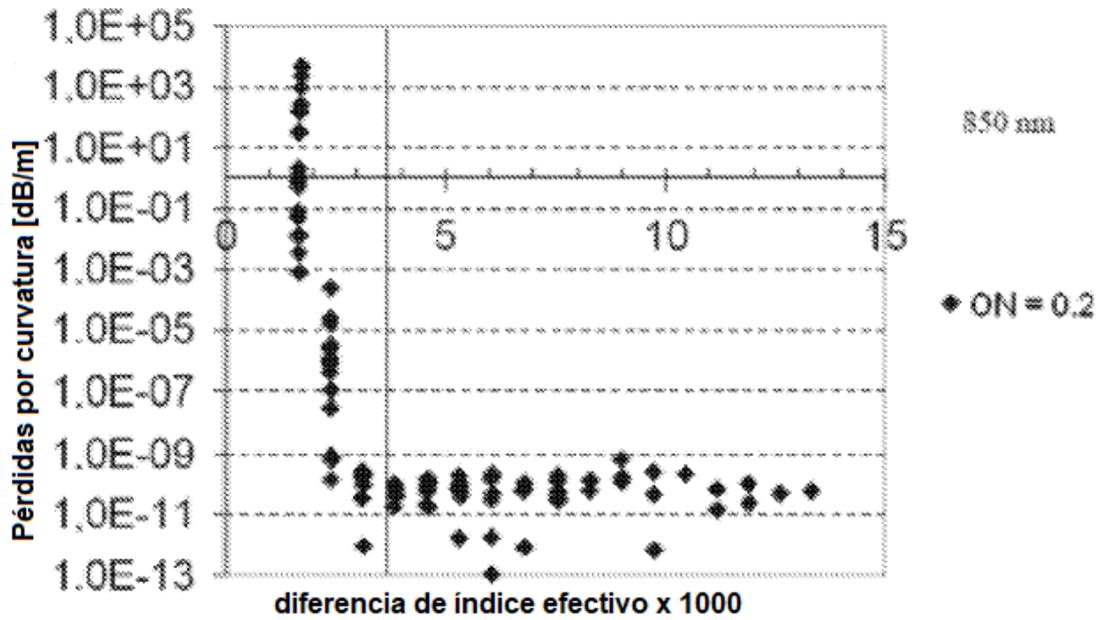


Figura 2

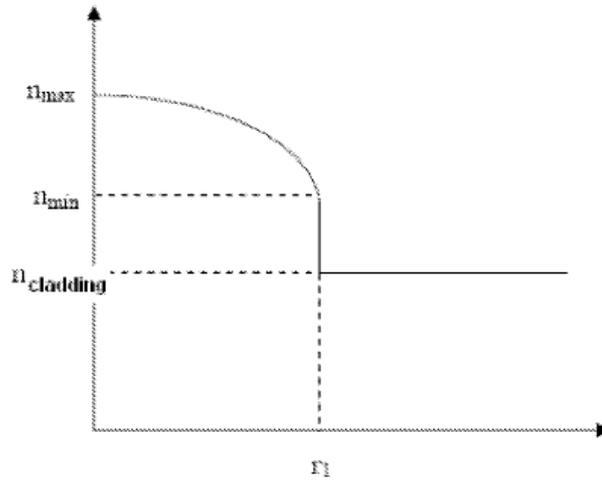


Figura 3

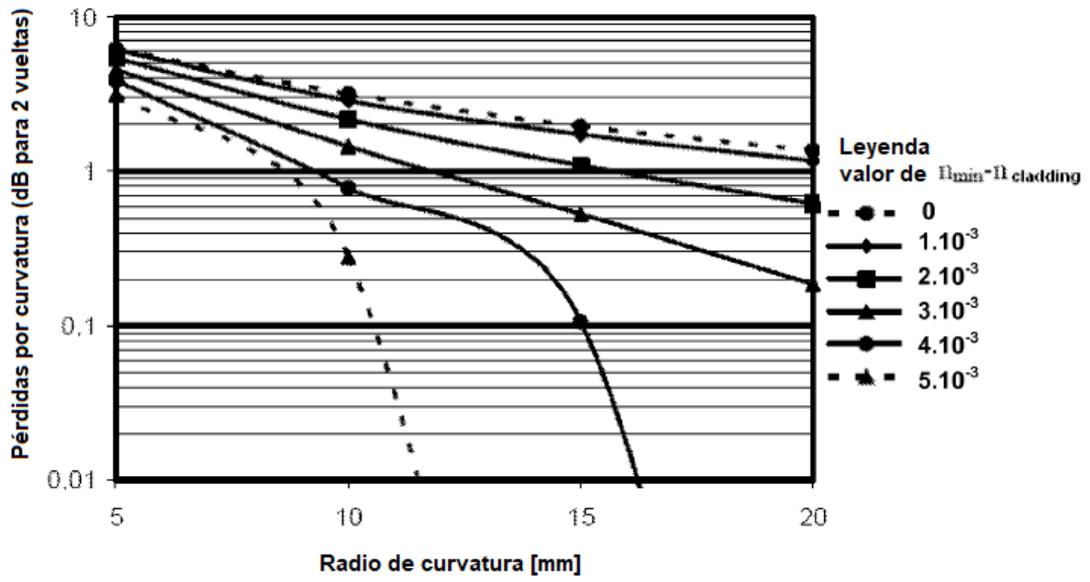


Figura 4

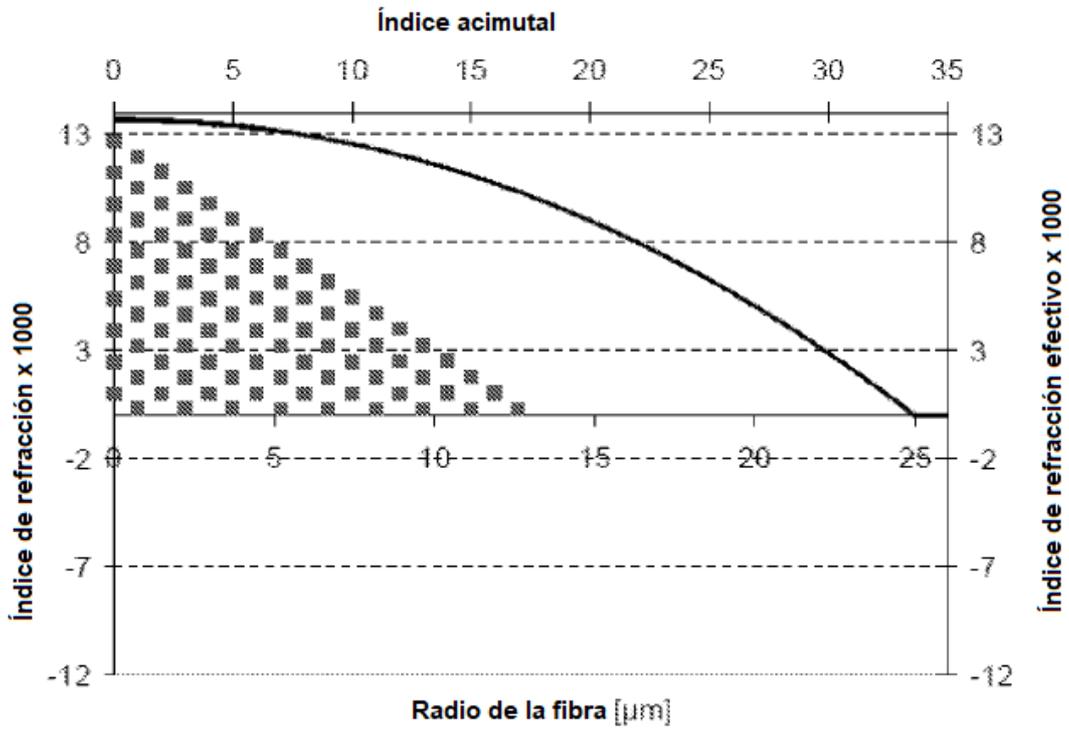


Figura 5

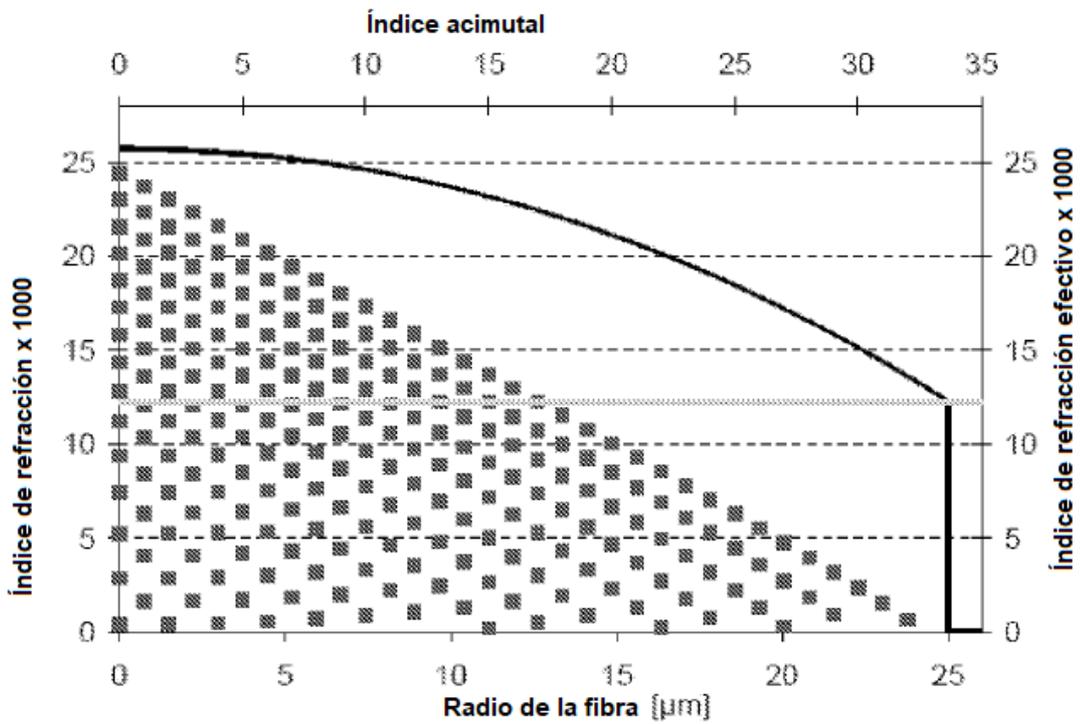
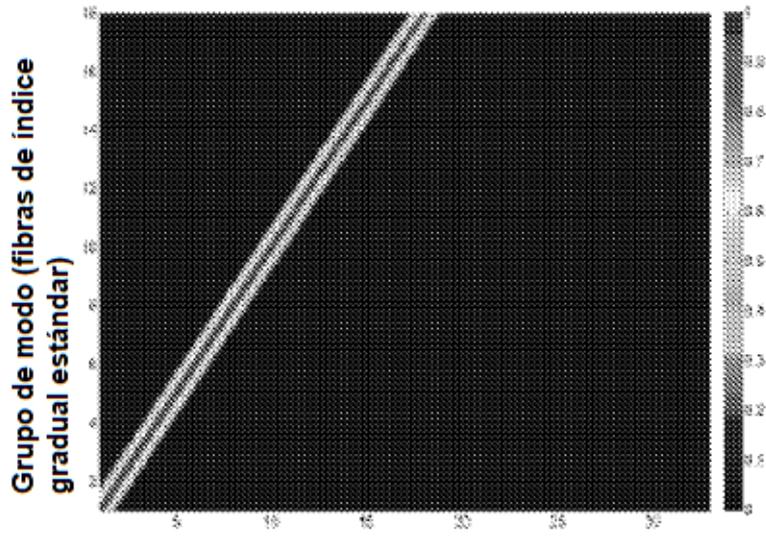
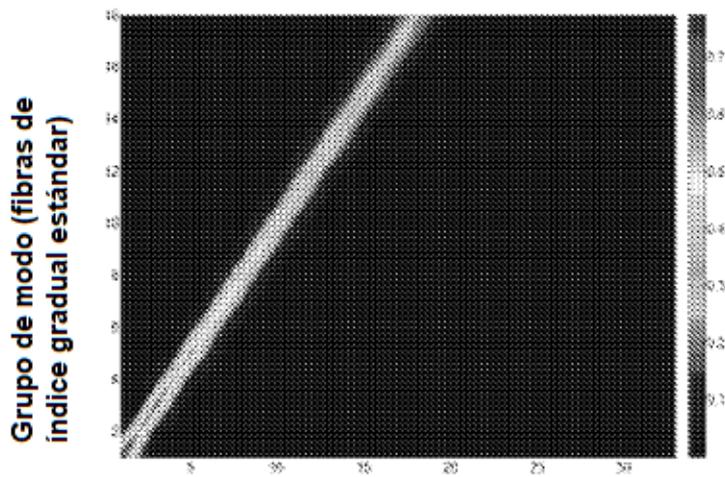


Figura 6



Grupos de modo (fibra de acuerdo con la invención)

Figura 7



Grupo de modo (fibra de acuerdo con la invención)

Figura 8

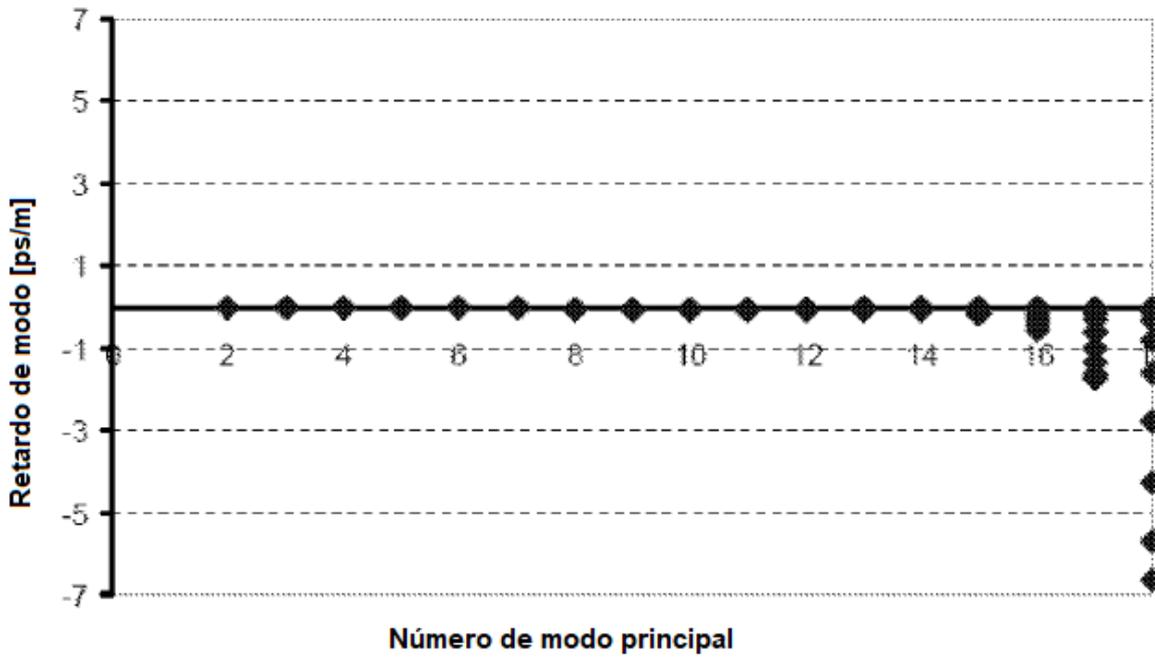


Figura 9

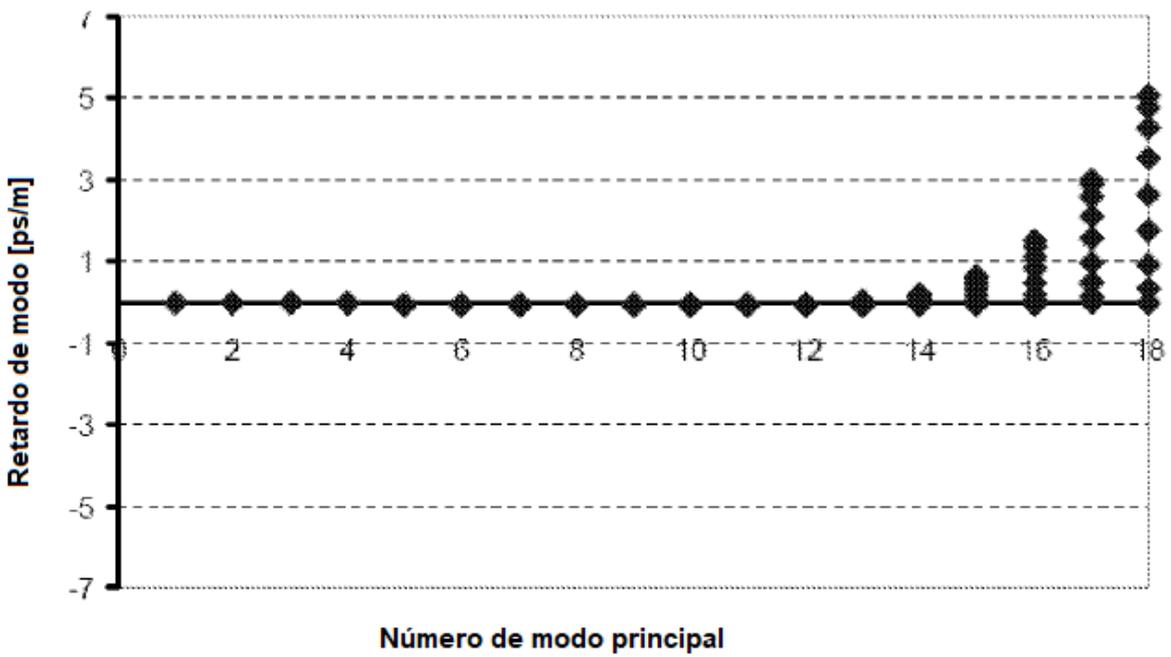


Figura 10

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 citado en la descripción

- EP 1164393 A1 [0016]
- JP 2002318315 A [0016]
- EP 2056138 A1 [0016]
- US 4176911 A [0016]
- EP 1727302 A [0016] [0055]
- WO 2008085851 A [0017] [0018]
- US 20080166094 A [0017] [0018]
- US 5522007 A [0061]
- US 5194714 A [0061]
- US 6269663 B [0061]
- US 6202447 B [0061]

10 Bibliografía no de patentes citada en la descripción

- **D. GLOGE et al.** *Bell system Technical Journal*, 1973, 1563-1578 [0006]
- **G. YABRE.** *Journal of Lightwave Technology*, February 2000, vol. 18 (2), 166-177 [0006]
- **JACOMME L.** *applied optics USA*, 01 November 1975, vol. 14 (11), 2578-2584 [0016]