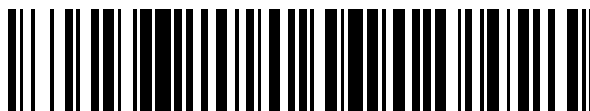


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 617 491**

51 Int. Cl.:

**G02B 6/02** (2006.01)

**G02B 6/028** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **11.10.2012 PCT/IB2012/002228**

87 Fecha y número de publicación internacional: **17.04.2014 WO2014057299**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **11.10.2012 E 12813954 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **07.12.2016 EP 2906976**

54 Título: **Fibra óptica de modos múltiples de elevado ancho de banda optimizada para transmisiones de modo único y de modos múltiples**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**19.06.2017**

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**MOLIN, DENIS;**  
**SANSONETTI, PIERRE y**  
**SILLARD, PIERRE**

74 Agente/Representante:

**ARPE FERNÁNDEZ, Manuel**

ES 2 617 491 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 de elevado ancho de banda optimizada para transmisiones de modo único y de modos múltiples

## 1. CAMPO DE LA INVENCION

**[0001]** La invención se refiere a transmisión por fibra óptica, y más específicamente, a una fibra óptica optimizada para soportar transmisiones tanto de modo único como de modos múltiples.

## 2. ANTECEDENTES TECNOLÓGICOS

**[0002]** Una fibra óptica está constituida convencionalmente por un núcleo óptico que transmite una señal óptica, y de un revestimiento óptico que confina la señal óptica dentro del núcleo óptico. Con este fin, el índice de refracción del núcleo,  $n_c$ , es mayor que el del revestimiento,  $n_g$ . Una fibra óptica se caracteriza generalmente por un perfil de índice de refracción que asocia el índice de refracción ( $n$ ) con el radio ( $r$ ) de la fibra óptica: la distancia  $r$  con respecto al centro de la fibra óptica se muestra en el eje  $x$  y la diferencia entre el índice de refracción en el radio  $r$  y el índice de refracción del revestimiento óptico se muestra en el eje  $y$ .

**[0003]** En la actualidad existen dos categorías principales de fibras ópticas: 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 óptica, mientras que en una fibra de modo único, los modos de orden superior (denominados en lo sucesivo HOM) son eliminados o fuertemente atenuados.

**[0004]** Las fibras de modo único se usan comúnmente para aplicaciones de larga distancia, tales como redes de acceso. Para obtener una fibra óptica capaz de transmitir una señal óptica de modo único, se requiere un núcleo con un diámetro relativamente pequeño (típicamente entre 5  $\mu\text{m}$  y 11  $\mu\text{m}$ ). Para satisfacer los requisitos de aplicaciones de alta velocidad o tasa binaria (por ejemplo 10 Gbps), las fibras de modo único estándar requieren la utilización de un emisor láser de modo único modulado sintonizado para trabajar normalmente a una longitud de onda de 1550 nm.

**[0005]** Las fibras de modos múltiples se usan comúnmente para aplicaciones de corta distancia que requieren un ancho de banda elevado, tales como redes de área local (LAN) y unidades de múltiples viviendas (MDU), más generalmente conocidas como redes en edificio. El núcleo de una fibra de modos múltiples tiene típicamente un diámetro de 50  $\mu\text{m}$ , o 62,5  $\mu\text{m}$ . Las fibras de modos múltiples predominantes en telecomunicaciones son fibras ópticas de perfil de índice refracción graduado. Un perfil de índice de refracción tal, garantiza un ancho de banda modal alto para una longitud de onda dada, mediante la minimización de la dispersión intermodal (es decir, la diferencia entre los tiempos de retardo de propagación o velocidad de grupo de los modos ópticos a lo largo de la fibra óptica).

**[0006]** Para el desarrollo de una red óptica doméstica, la elección de la categoría de fibra óptica es crítica. La fibra de modos múltiples es una solución rentable para redes ópticas de datos. Gracias a su apertura numérica más amplia y su diámetro de núcleo, y su dispersión modal baja proporcionada por su perfil de núcleo de índice graduado, las fibras de modos múltiples pueden soportar eficientemente señales ópticas de 10 Gbps, emitidas por soluciones basadas en fuentes de luz económicas (tales como Vertical Cavity Surface Emitting Laser [láser emisor superficial de cavidad vertical] o VCSEL), mientras que las fibras de modo único requieren transceptores de modo único caros y con tolerancia. En particular, la conexión de la fuente luminosa con la fibra de modo único (condiciones de lanzamiento) requiere tolerancias de alineación más estrictas que con la fibra de modos múltiples.

**[0007]** Sin embargo, dado que se espera que la red doméstica óptica esté conectada a redes de acceso externas, que utilizan principalmente tecnología de modo único debido a requisitos de mayor alcance, el problema de interoperabilidad con fibras de modo único necesita consideraciones adicionales.

**[0008]** En la práctica, las fibras de modos múltiples no están diseñadas para interconectarse con sistemas de transmisión de modo único. Una red doméstica puede ser vista como una red de fibras ópticas que permite a los usuarios conectar dispositivos en ambos extremos de la red. Actualmente, los dispositivos están probablemente para ejecutar tecnologías basadas en transmisión óptica de modos múltiples que requieren fibras de modos múltiples, mientras que mañana podrían estar diseñadas para funcionar también con una tecnología basada en modo único.

**[0009]** Por lo tanto, es deseable proporcionar una fibra óptica híbrida para una red doméstica que pueda transmitir tanto señales ópticas de modos múltiples a una longitud de onda operativa de la red doméstica, por ejemplo 850 nm, como señales ópticas de modo único a una longitud de onda operativa de una red de acceso, por ejemplo, 1550 nm, con una compensación adecuada de las propiedades ópticas.

**[0010]** Una solución conocida consistiría en utilizar una fibra de modos múltiples estándar que tenga un perfil de índice de refracción graduado optimizado para proporcionar transmisión exenta de error con un ancho de banda amplio para una longitud de onda de 850 nm. Sin embargo, cuando una fuente de modo único funcionando a una longitud de onda de 1550 nm, se acopla a la fibra de modos múltiples estándar, la señal óptica inyectada en la fibra estimula, principal pero desafortunadamente no sólo el modo óptico fundamental, sino también los HOM dentro de la fibra óptica. Estos HOM inducen ruidos modales que degradan la calidad de la transmisión óptica. En realidad existen dos categorías principales de ruidos modales: ruidos coherentes e incoherentes.

**[0011]** El ruido incoherente se basa en el hecho de que, en el lado emisor, la señal óptica acoplada en los HOM de la fibra puede sufrir de dispersión modal, y por lo tanto, puesto que los diferentes modos tienen diferentes tiempos de retardo de propagación y constantes de propagación, estos HOM, pueden degradar la calidad de la transmisión

5 óptica superponiendo en el lado receptor copias retardadas de la señal óptica principal. En la práctica, para buen funcionamiento en una aplicación de alto ancho de banda, una fibra óptica debe tener la más alta calidad de transmisión óptica, la cual puede medirse mediante la relación señal-ruido. Para la contribución incoherente, la relación señal-ruido, denominada en lo sucesivo "relación señal/ruido incoherente", se puede definir mediante la siguiente ecuación

$$SNR_{\text{incoherente}} = \frac{|\gamma|^4}{\sum_i |\beta_i|^4} \quad (I)$$

donde:

10  $|\gamma|^2$  es la potencia óptica acoplada al modo fundamental;  
 $|\beta_i|^2$  es la potencia óptica acoplada a los modos de orden superior (HOM), con  $i \geq 1$ .

15 **[0012]** El ruido coherente se basa en el hecho de que la señal óptica acoplada a los HOM de la fibra en el lado emisor puede generar desajuste de fase con la señal óptica acoplada al modo fundamental, dando lugar en el lado del receptor a recombinaciones interferométricas sin controlar en el modo fundamental. Estas interferencias inducen una fluctuación de potencia óptica que también degrada la calidad de la transmisión óptica. Para la contribución coherente, la relación señal/ruido, denominada en lo sucesivo "relación señal/ruido coherente", se puede definir mediante la siguiente ecuación:

$$SNR_{\text{coherente}} = \frac{(|\gamma|^4 + \sum_i |\beta_i|^4)}{\sigma_{\text{coherente}}} \quad (II)$$

donde:

25  $|\gamma|^2$  es la potencia óptica acoplada al modo fundamental;  
 $|\beta_i|^2$  es la potencia óptica acoplada a los modos de orden superior (HOM), con  $i \geq 1$ ;  
 $\sigma_{\text{coherente}}$  es un coeficiente de desviación estándar de un ruido gaussiano.

30 **[0013]** Como resultado de ello, cuando se acopla menos potencia óptica a los HOM, se mejora la calidad de transmisión óptica de la fibra óptica.

**[0014]** Debido a la presencia de estos ruidos modales, una fibra de modos múltiples estándar tal no está adaptada, por tanto, a una interconexión con un sistema de transmisión óptica de modo único.

35 **[0015]** Por lo tanto, sería eficaz proporcionar una fibra óptica que tenga un ancho de banda modal amplio a una longitud de onda de 850 nm y un nivel significativamente reducido de ruidos modales a una longitud de onda de 1310 nm o 1550 nm.

40 **[0016]** El documento de patente australiana AU 2002/100296, revela una fibra óptica que comprende una porción de núcleo de modo único, que tiene un primer índice de refracción, rodeado por una porción de núcleo de modos múltiples, que tiene un segundo índice de refracción, finalmente rodeado por un revestimiento que tiene un tercer índice de refracción. El perfil de índice de múltiples porciones, está dispuesto de manera que el modo fundamental esté sustancialmente adaptado a los de una fibra de modo único. Sin embargo, este documento no proporciona ninguna solución para minimizar los ruidos modales producidos por los HOM de la fibra óptica. La fibra óptica revelada presenta además un ancho de banda modal relativamente bajo a 850 nm y requiere un diseño de perfil de índice complejo.

45 **[0017]** El documento de patente francesa FR 2441858, revela una fibra óptica con un núcleo central de modo único y una funda de modos múltiples para transmisión de datos. En particular, la fibra óptica revelada no presenta un perfil de índice graduado (la porción de fibra de modos múltiples tiene un perfil de índice escalonado), lo que no permite cumplir los requisitos en términos de ancho de banda modal elevado a 850 nm. Tampoco aborda el problema de la reducción de ruidos modales a una longitud de onda de 1310 nm o 1550 nm.

50 **[0018]** Una solución al problema de los ruidos modales, sería reducir el diámetro del núcleo de la fibra de modos múltiples. Sin embargo, reducir el diámetro del núcleo óptico conduce a degradar la calidad de las transmisiones ópticas de modos múltiples. De hecho, cuando se lleva a cabo una conexión con una fibra óptica estándar (es decir, una fibra que tiene un diámetro de 50  $\mu\text{m}$  o 62,5  $\mu\text{m}$ ), las pérdidas de transmisión óptica son aún más considerables cuando el diámetro del núcleo es pequeño, limitando significativamente así el ancho de banda modal de la fibra óptica para transmisiones ópticas de modos múltiples. Por lo tanto, tal solución no es óptima.

### 55 3. OBJETIVOS DE LA INVENCION

**[0019]** La invención, en al menos una realización, apunta especialmente a superar estos diferentes inconvenientes del estado de la técnica.

60 **[0020]** Más específicamente, un objetivo de, al menos, una realización de la invención es proporcionar una fibra óptica optimizada para soportar tanto transmisiones de modo único como de modos múltiples con un equilibrio adecuado en términos de propiedades ópticas para aplicaciones de alta velocidad de datos.

[0021] También es un objetivo de, al menos, una realización de la invención, proporcionar una fibra óptica que ofrezca el ancho de banda modal más amplio para la transmisión de modos múltiples a largas distancias y que mantenga un modo fundamental similar al requerido para la transmisión de modo único.

5 [0022] También resulta ser un objetivo de, al menos, una realización de la invención, proporcionar una fibra óptica que reduzca significativamente los ruidos modales para longitudes de onda de 1310 nm y 1550 nm, al tiempo que proporciona un amplio ancho de banda modal a una longitud de onda de 850 nm.

[0023] También es un objetivo de, al menos, una realización de la invención, proporcionar una fibra óptica que sea sencilla de fabricar y pequeño coste.

10 4. SUMARIO DE LA INVENCION

[0024] En una realización particular de la invención se propone una fibra óptica que comprende un núcleo óptico y un revestimiento óptico que rodea el núcleo óptico, teniendo el núcleo óptico un perfil de índice de refracción graduado con un índice de refracción mínimo  $n_1$  y un índice de refracción máximo  $n_0$ , siendo dicha fibra tal que tiene una apertura numérica  $NA$  y un radio de núcleo óptico  $a$  que satisfacen un criterio  $C$  de calidad de comunicaciones ópticas, definido por la siguiente ecuación:

$$C = NA - 0.02 \times a$$

donde

20

$$NA = \sqrt{n_0^2 - n_1^2} = n_0 \cdot \sqrt{2\Delta} \quad \text{con} \quad \Delta = \frac{n_0^2 - n_1^2}{2 n_0^2}$$

$\Delta$  es la diferencia de índice de refracción normalizada, y en la que dichos índices de refracción mínimo y máximo  $n_1$ ,  $n_0$  y dicho radio de núcleo óptico  $a$ , se eligen de manera que  $NA > 0,20$ ,  $a > 1\mu\text{m}$  y  $|C| < 0,20$ .

25

[0025] De este modo, adaptando los valores de apertura numérica y diámetro del núcleo para satisfacer un criterio de calidad definido por la ecuación antes mencionada, la invención proporciona una fibra óptica de índice graduado optimizada para soportar tanto transmisiones de modo único como de modos múltiples con una adecuada compensación en términos de propiedades ópticas para aplicaciones de alta velocidad de datos.

30

[0026] Para ello, la invención se basa en establecer una compensación entre el diámetro del núcleo y la apertura numérica de la fibra óptica que permita reducir significativamente los ruidos modales coherentes e incoherentes para las longitudes de onda de modo único y dar un ancho de banda modal elevado en longitudes de onda de modos múltiples. De hecho, los inventores descubrieron que el diámetro del núcleo y la apertura numérica de una fibra óptica de índice graduado están fuertemente correlacionados tanto con la relación señal-ruido coherente como la relación señal-ruido incoherente en longitudes de onda de transmisión de modo único. Parece especialmente que la disminución del diámetro del núcleo promueve ruidos modales coherentes e incoherentes menores en longitudes de onda de modo único y que el aumento de la apertura numérica de la fibra óptica conduce inesperadamente a obtener un mayor número de modos ópticos en longitudes de onda de modos múltiples.

35

[0027] De acuerdo con una característica ventajosa, dichos índices de refracción mínimos y máximos  $n_1$ ,  $n_0$  y dicho radio de núcleo óptico  $a$  se eligen de manera que  $|C| < 0,10$ .

40

[0028] Los ruidos modales coherentes e incoherentes se reducen aún más.

[0029] De acuerdo con una característica más ventajosa, dichos índices de refracción mínimo y máximo  $n_1$ ,  $n_0$  y dicho radio de núcleo óptico  $a$  se eligen de tal manera que  $|C| < 0,05$ .

45

[0030] Los ruidos modales coherentes e incoherentes se reducen aún más.

[0031] De acuerdo con otra característica ventajosa, dichos índices de refracción mínimo y máximo  $n_1$ ,  $n_0$  y dicho radio de núcleo óptico  $a$  se eligen de manera que  $C < 0$ .

[0032] Esto promueve un radio de núcleo mayor.

[0033] Ventajosamente, dicho radio de núcleo óptico es tal que  $a > 14\mu\text{m}$ , y más preferiblemente  $a > 19\mu\text{m}$ , e incluso más preferiblemente  $a = 25\mu\text{m}$ .

50

[0034] La calidad de las transmisiones ópticas de modos múltiples se mejora aún más disminuyendo las pérdidas de empalme, por ejemplo, con fibras ópticas de modos múltiples de diámetro estándar de  $50\mu\text{m}$ .

[0035] Ventajosamente, dichos índices de refracción mínimo y máximo  $n_1$ ,  $n_0$  se eligen de modo que  $NA > 0,25$ , más preferiblemente  $NA > 0,30$ , e incluso más preferentemente  $NA > 0,34$ .

55

[0036] De acuerdo con una primera realización particular, el perfil de índice de refracción graduado es un perfil de índice graduado de alfa única  $n(r)$ , definido por la siguiente ecuación

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

60 donde:

$r$  es una variable representativa del radio de dicha fibra óptica  
 $\alpha \geq 1$ , siendo  $\alpha$  un parámetro adimensional que define la forma de perfil de índice del núcleo óptico.

5 **[0037]** La fibra óptica de acuerdo con la invención es por tanto sencilla de fabricar y poco costosa, ya que todo lo que se necesita es adaptar el dopado de las diferentes porciones de fibra en función del perfil de índice de refracción deseado que satisfaga dicho criterio de calidad.

**[0038]** De acuerdo con una segunda realización particular, el núcleo óptico, comprende un núcleo óptico interno y un núcleo óptico externo que rodea el núcleo óptico interno y el perfil de índice de refracción graduado es un perfil de índice graduado de alfa doble  $n(r)$ , definido por el Siguiendo la ecuación

10

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

donde:

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

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

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

15

$$n_2' = n_1 \cdot \sqrt{\frac{(1 - 2\Delta) \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \left(\frac{r_t}{a}\right)^{\alpha_2} - \alpha_1}{(1 - 2\Delta) \cdot \left((\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \left(\frac{r_t}{a}\right)^{\alpha_2} - \alpha_1\right)}}$$

$r$  es una variable representativa del radio de dicha fibra óptica,  
 $r_t$  es el radio del núcleo óptico interno,  
 $n_1'$  es el índice de refracción máximo del núcleo óptico interno,  
 $n_2'$  es el índice de refracción máximo del núcleo óptico externo,  
 $\Delta_1$  es la diferencia de índice de refracción normalizada con respecto al núcleo óptico interno,  
 $\Delta_2$  es la diferencia de índice de refracción normalizada con respecto al núcleo óptico externo,  
 $\alpha_1 \geq 1$ , siendo  $\alpha_1$  un parámetro adimensional que define la forma del perfil de índice del núcleo óptico interno,  
 $\alpha_2 \geq 1$ , siendo  $\alpha_2$  un parámetro adimensional que define la forma del perfil de índice del núcleo óptico externo.

20

25

30

**[0039]** Así, al minimizar la dispersión intermodal por medio de un perfil de índice graduado de alfa doble, se optimiza el ancho de banda modal de la fibra óptica en longitudes de onda de modos múltiples, especialmente para las aberturas numéricas mayores permitidas por dicho criterio de calidad de comunicaciones ópticas.

**[0040]** Además, la fibra óptica de esa realización alternativa, es sencilla de fabricar y poco costosa, ya que todo lo que se necesita es adaptar el dopado de las diferentes porciones de fibra como una función del perfil de índice de refracción deseado que satisfaga dicho criterio de calidad.

[0041] De acuerdo con una característica ventajosa, el revestimiento óptico comprende una zanja deprimida que rodea el núcleo óptico o una interfaz núcleo-revestimiento proyectada.

[0042] Una fibra óptica asistida con zanja deprimida conduce a disminuir las pérdidas de macro-curvatura mediante la mejora del confinamiento de los modos ópticos dentro del núcleo. Una solución de núcleo-revestimiento proyectada tiene como objetivo mitigar el efecto de revestimiento y, de este modo, ampliar el ancho de banda modal de la fibra.

[0043] En otra realización, la invención se refiere a un sistema óptico, tal como una red óptica doméstica, que comprende, al menos, una fibra óptica descrita anteriormente en cualquiera de sus diferentes realizaciones.

[0044] Este sistema óptico puede ser una red óptica doméstica, tal como una red de área local (LAN) y/o una unidad de múltiples viviendas (MDU), por ejemplo.

## 5. LISTA DE FIGURAS

[0045] Otras características y ventajas de las realizaciones de la invención resultarán a partir de la siguiente descripción, dada a modo de ejemplos ilustrativos y no exhaustivos y de los dibujos adjuntos, en los cuales:

- La figura 1A, proporciona una gráfica del perfil de índice de refracción de una fibra óptica de acuerdo con una primera realización de la invención;

- La figura 2A, proporciona una gráfica del perfil de índice de refracción de una fibra óptica de acuerdo con una segunda realización de la invención;

- Las figuras 1B y 2B, representan respectivamente las mediciones de retardo de modo diferencial llevadas a cabo sobre las fibras ópticas de la figura 1A y 2A, respectivamente;

- La figura 3, representa gráficamente la relación señal-ruido incoherente a una longitud de onda de 1550 nm como función de la apertura numérica y el radio de núcleo de una fibra óptica de índice graduado;

- La figura 4, representa gráficamente la relación señal-ruido coherente a una longitud de onda de 1550 nm como función de la apertura numérica y el radio de núcleo de una fibra óptica de índice graduado;

- La figura 5 representa gráficamente las relaciones señal-ruido coherente y señal-ruido incoherente a longitudes de onda de 1550 nm y 1310 nm, como una función de un criterio de calidad de comunicaciones ópticas establecido de acuerdo con la invención;

- La figura 6, representa gráficamente las pérdidas de conexión acumuladas en función de la apertura numérica y el radio del núcleo de una fibra óptica de índice graduado;

- La figura 7, ilustra un diagrama esquemático utilizado para medir las pérdidas de conexión acumuladas bajo condiciones de lanzamiento de modos múltiples, definidas en la norma " Encircled Flux (flujo restringido)" (IEC 61280-4-1);

- La figura 8, ilustra gráficamente el patrón de flujo restringido utilizado para llevar a cabo el diagrama esquemático de la figura 7.

## 6. DESCRIPCIÓN DETALLADA

[0046] El principio general de la invención es proponer una fibra óptica para la cual los valores de apertura numérica y diámetro de núcleo, están adaptados para soportar funcionamiento de modos múltiples hasta una longitud de onda de 1550 nm con un ancho de banda modal elevado a una longitud de onda de 850 nm para un funcionamiento a 10 Gbps (desde pocas decenas a unos pocos cientos de metros) y con ruidos modales reducidos cuando dicha fibra óptica se acopla a fibras de modo único estándar para una transmisión fiable de alta velocidad con sistemas de transmisión de modo único.

[0047] La figura 1A representa el perfil de índice de refracción  $n(r)$  de una fibra óptica de acuerdo con una primera realización de la invención. Describe la relación entre el valor  $n$  del índice de refracción y la distancia  $r$  medida desde el centro de la fibra óptica.

[0048] En esta primera realización, la fibra óptica es una fibra óptica de índice graduado que tiene un perfil de índice de refracción  $n(r)$ , definido como sigue:

$$n(r) = \begin{cases} n_0 \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot \Delta \cdot \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha} & r \leq a \\ n_0 \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot \Delta} & r \geq a \end{cases} \quad (\text{III})$$

dónde:

$r$  es una variable representativa del radio de la fibra óptica,  
 $a$  es el radio del núcleo óptico,

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

$\Delta$  es la diferencia de índice de refracción normalizada, con  
 $n_1$  es el índice de refracción mínimo del núcleo óptico,

$n_0$  es el índice de refracción máximo del núcleo óptico,

$\alpha$  es un parámetro adimensional que define la forma del perfil de índice del núcleo óptico, que se elige entre 1,9 y 2,2 para proporcionar el mayor ancho de banda a la longitud de onda operativa objetivo.

5 **[0049]** La fibra óptica comprende, para  $0 \leq r \leq a$ , un núcleo óptico que implementa un perfil de índice graduado de alfa única y, para  $a \leq r$ , un revestimiento óptico que rodea directamente al núcleo óptico y que tiene un índice de refracción constante estándar. El perfil de índice de refracción alfa del núcleo óptico permite reducir la dispersión intermodal de la fibra óptica.

10 **[0050]** De acuerdo con la invención, el núcleo óptico tiene un perfil de índice graduado para el cual se ajustan los valores de apertura numérica  $NA$  y radio del núcleo  $a$  (expresado en micrómetros) de modo que satisfagan la siguiente ecuación:

$$C = NA - 0.02 \times a \quad (\text{IV})$$

dónde:

15  $NA$  está unido unívocamente a la diferencia de índice de refracción normalizada  $\Delta$  y siendo el índice de refracción máximo del núcleo óptico  $n_0$  como sigue:  $NA = \sqrt{n_0^2 - n_1^2} = n_0 \cdot \sqrt{2\Delta}$  (V)  $a > 10 \mu\text{m}$ ,  $|C| < 0,20$ , siendo  $C$  un número real, que representa un criterio de calidad de las comunicaciones ópticas.

20 **[0051]** Adaptando los valores de la apertura numérica  $NA$  y diámetro del núcleo  $a$  para satisfacer la ecuación anterior (IV), la invención proporciona una fibra óptica de índice graduado optimizada para reducir eficazmente ruidos modales coherentes e incoherentes a una longitud de onda de modo único de 1550 nm, manteniendo un ancho de banda modal alto a una longitud de onda de modos múltiples de 850 nm.

25 **[0052]** Los inventores establecieron que la ecuación (IV) corresponde a un criterio de calidad de comunicaciones ópticas predeterminado que asegura el soporte de transmisiones de modo único y de modos múltiples con una compensación adecuada en términos de propiedades ópticas para aplicaciones de alta velocidad de datos. Este criterio de calidad se ha obtenido mediante una evaluación numérica de la relación señal/ruido incoherente  $SNR_{\text{incoherente}} = \frac{|y|^4}{\sum_i |\beta_i|^4}$  y la relación señal-ruido coherente  $SNR_{\text{coherente}} = \frac{(|y|^4 + \sum_i |\beta_i|^4)}{\sigma_{\text{coherente}}}$  a una longitud de onda de 1550 nm como una función del radio del núcleo  $a$  y de la apertura numérica  $NA$ , como se representa en las figuras 3 y 4.

30 **[0053]** En el eje y izquierdo se representa la apertura numérica del núcleo óptico ( $NA$ ) y el eje x representa el radio del núcleo óptico ( $a$ ). Los valores de  $SNR_{\text{incoherente}}$  (figura 3) y de  $SNR_{\text{coherente}}$  (figura 4) correspondientes a una pareja de parámetros dada ( $NA$ ,  $a$ ) se ilustran en tonos de gris en el eje y derecho.

35 **[0054]** Los inventores descubrieron que el radio de núcleo y la apertura numérica de una fibra óptica de índice graduado están fuertemente correlacionados tanto con la relación señal-ruido coherente como con la relación señal ruido incoherente para longitudes de onda de transmisión tanto de modo único como de modos múltiples. Basándose en este principio, se han simulado  $SNR_{\text{incoherente}}$  y  $SNR_{\text{coherente}}$  con varios valores de apertura numérica y radio de núcleo para establecer una relación que permita una reducción significativa de ruidos modales a una longitud de onda de modo único de 1550 nm, al tiempo que proporciona el ancho de banda modal más amplio a una longitud de onda de modos múltiples de 850 nm. El criterio de calidad se ha derivado de esas evaluaciones numéricas suponiendo que para valores de radio de núcleo mayores de 10  $\mu\text{m}$ ,  $SNR_{\text{incoherente}}$  y  $SNR_{\text{coherente}}$  deben ser mayores de 0 dB y más preferentemente  $SNR_{\text{incoherente}}$  será aproximadamente mayor de 20 dB y  $SNR_{\text{coherente}}$  será aproximadamente mayor que 10 dB a la longitud de onda de 1550 nm.

40 **[0055]** Especialmente parece que la disminución del radio del núcleo ( $a$ ) y el aumento de la apertura numérica ( $NA$ ) conducen a promover mayores  $SNR_{\text{coherente}}$  y  $SNR_{\text{incoherente}}$  a 1550 nm. Además, parece ser que cuanto mayor sea la apertura numérica, mayor será el radio de núcleo  $a$ , a establecer, por lo que las transmisiones ópticas de modos múltiples pueden optimizarse para satisfacer las demandas de aplicaciones de gran ancho de banda (normalmente 10 Gbps) a largas distancias (desde unas pocas decenas a unos pocos cientos de metros), como en redes de transmisión de alta velocidad de Ethernet.

45 **[0056]** Como un ejemplo estrictamente ilustrativo (y por lo tanto de carácter no limitativo), el radio del núcleo óptico  $a$  ilustrado en la figura 1, es de aproximadamente 19  $\mu\text{m}$  y siendo la apertura numérica  $NA$  de aproximadamente 0,297, satisfaciendo así el criterio de calidad de las comunicaciones ópticas establecido en el cumplimiento de la invención. El parámetro  $\alpha$  del perfil de índice del núcleo óptico es de aproximadamente 2,065 y siendo la diferencia del índice de refracción normalizada  $\Delta$  aproximadamente el 2% ( $n_1$  es aproximadamente igual a 1,457 y  $n_0$  aproximadamente igual a 1,487).

50 **[0057]** Las ventajas de la invención resultarán más evidentes comparando fibras ópticas de la técnica anterior con una fibra óptica ejemplar de acuerdo con la invención. La tabla 1 muestra los valores del radio del núcleo y la apertura numérica de las fibras ópticas de índice graduado estándar y el valor del criterio  $C$  de calidad que se obtendría utilizando la ecuación (IV) anterior. Estando sometidas las fibras de la técnica anterior a una señal óptica de una longitud de onda  $\lambda$  de 850nm para las redes de alta velocidad.

60

Tabla 1		
a (μm)	NA	C (a, NA)
25	0,200	-0,30
31,25	0,275	-0,35
40	0,290	-0,51
25	0,290	-0,21

**[0058]** La gráfica de la figura 5, representa las relaciones señal ruido coherente y señal ruido incoherente para longitudes de onda de 1550 nm y 1310 nm en función del criterio de calidad C expuesto anteriormente en relación con las figuras 1, 3, 4, y aplicadas tanto a fibras ópticas de índice graduado de la técnica anterior como a fibras ópticas de la invención. En el eje y se representa  $SNR_{coherente}$  y  $SNR_{incoherente}$  (en dB) y en el eje x se representan diferentes valores del criterio de calidad C comprendidos entre -0,60 y 0,20.

**[0059]** Puede observarse que ninguna de las fibras ópticas de la técnica anterior posee un perfil de índice de núcleo que permita satisfacer el criterio C de calidad de la invención  $|C| < 0,20$ , lo que en consecuencia se refleja en menores valores de SNR en comparación con los resultantes de la invención. Este gráfico muestra que el modelo según la invención conduce al establecimiento de un buen criterio de calidad.

**[0060]** Además, con el fin de mejorar aún más las  $SNR_{coherente}$  y  $SNR_{incoherente}$ , el criterio de calidad puede establecerse ventajosamente tal como  $|C| < 0,10$  (es decir,  $|NA - 0,02 \times a| < 0,10$ ), y más ventajosamente tal como  $|C| < 0,05$  (es decir,  $|NA - 0,02 \times a| < 0,05$ ), preferiblemente con  $C < 0$ . Se puede observar que estas relaciones señal-ruido se maximizan cuando el valor de C es próximo a 0.

**[0061]** De acuerdo con una característica ventajosa, el perfil de índice de la fibra óptica de la figura 1, puede comprender una porción de índice deprimido (no mostrada en la figura 1) situada entre el núcleo de índice graduado y el revestimiento. Esta porción de índice deprimido, también denominada zanja deprimida, tiene una diferencia de índice de refracción negativo con respecto al revestimiento de fibra óptica, y su posición y tamaño están diseñados para mejorar la resistencia a pérdidas por curvatura de la fibra de modos múltiples.

**[0062]** La figura 2A, proporciona una gráfica del perfil de índice de refracción  $n(r)$  de una fibra óptica de acuerdo con una segunda realización de la invención.

**[0063]** En dicha segunda realización, la fibra óptica presenta un núcleo óptico constituido por dos porciones, un núcleo óptico interno y un núcleo óptico externo que rodea el núcleo óptico interno, y siendo el perfil de índice de refracción graduado, un perfil de índice graduado de alfa doble  $n(r)$ , definido por la siguiente ecuación:

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

donde

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

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

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



$$n_2' = n_1 \cdot \sqrt{\frac{(1-2\Delta) \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \left(\frac{r_t}{a}\right)^{\alpha_2} - \alpha_1}{(1-2\Delta) \cdot \left((\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \left(\frac{r_t}{a}\right)^{\alpha_2} - \alpha_1\right)}}$$

r es una variable representativa del radio de dicha fibra óptica,

a es el radio del núcleo óptico que comprende núcleos ópticos tanto interior como exterior,

$r_t$  es el radio del núcleo óptico interno,

$n_1'$  es el índice de refracción máximo del núcleo óptico interno,

$n_2'$  es el índice de refracción máximo del núcleo óptico externo,

$\Delta_1$  es la diferencia de índice de refracción normalizada con respecto al núcleo óptico interno,

$\Delta_2$  es la diferencia de índice de refracción normalizada con respecto al núcleo óptico externo,

$\alpha_1 \geq 1$ , siendo  $\alpha_1$  un parámetro adimensional que define la forma del perfil de índice del núcleo óptico interno,

$\alpha_2 \geq 1$ , siendo  $\alpha_2$  un parámetro adimensional que define la forma del perfil de índice del núcleo óptico externo.

**[0064]** Los respectivos parámetros  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$  y  $n_1'$ ,  $n_2'$ , aseguran la continuidad del perfil de índice de refracción y su primera derivada en la transición del núcleo interno al núcleo externo.

**[0065]** Ese perfil de índice de alfa doble particular, ofrece como ventaja el ser capaz de mejorar aún más el ancho de banda modal de la fibra óptica en longitudes de onda de modos múltiples.

**[0066]** Todo lo que se ha dicho hasta ahora en relación con la figura 1A, 3 a 5, sobre el criterio de calidad, se aplica mutatis mutandis a esta segunda realización de la invención. Además, con el fin de mejorar adicionalmente el ancho de banda modal de la fibra óptica, la fibra según la segunda realización puede comprender una zanja deprimida como se ha descrito anteriormente de acuerdo con la explicación proporcionada en la figura 5.

**[0067]** Como ejemplo estrictamente ilustrativo (y por lo tanto de naturaleza no limitativa), el radio de núcleo óptico a ilustrado en la figura 2A es de aproximadamente 19  $\mu\text{m}$  y siendo la apertura numérica  $NA$  de aproximadamente 0,297, satisfaciendo así el criterio de calidad de comunicaciones ópticas establecido en el cumplimiento de la invención. Los parámetros  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  del perfil de índice del núcleo óptico son respectivamente de aproximadamente 2,0851 y 2,0433. El radio del núcleo óptico interno ( $r_t$ ) es de aproximadamente 0,5  $\mu\text{m}$ .

**[0068]** Las figuras 1B y 2B, representan respectivamente mediciones de retardo de modo diferencial (denominada en lo sucesivo "medición DMD") (por ejemplo, como se establece en el estándar FOTP-220), llevadas a cabo sobre las fibras ópticas de las figuras 1A y 2A, respectivamente. Este tipo de gráfico se obtiene inyectando sucesivamente en la fibra óptica de modos múltiples un impulso de luz que tiene una longitud de onda dada con una desviación radial entre cada impulso sucesivo. El retardo de cada impulso se mide después de una longitud dada de fibra. Se inyectan múltiples impulsos de luz idénticos con diferentes desviaciones radiales con respecto al centro del núcleo del núcleo óptico. En el eje y se representa la desviación radial (indicado como "lanzamiento radial" *sic* en la figura) en micrómetros con respecto al centro del núcleo del núcleo óptico y representándose en el eje x el tiempo en nanosegundos. A partir de estas mediciones DMD, es posible determinar el ancho de banda modal efectivo de la fibra óptica. De las gráficas 1B y 2B, se desprende que las fibras ópticas de la invención presentan un desfase temporal entre impulsos que se propagan a lo largo de diferentes desviaciones radiales que es relativamente bajo, lo que da lugar a un amplio ancho de banda modal. Además, se puede ver la ventaja del perfil de índice graduado de alfa doble (figura 2B), que representa mediciones de retardo de modo diferencial más estrechas que el del perfil de índice de alfa única (figura 1B), por lo tanto, tiene mejores anchos de banda modal.

**[0069]** Debe observarse que las mediciones de DMD realizadas con una desviación radial superior a 18  $\mu\text{m}$  no son relevantes. En particular, se pueden observar unos cuantos impulsos múltiples en el gráfico de la izquierda causados por el efecto de revestimiento.

**[0070]** La figura 6 representa las pérdidas de conexión acumuladas como función de la apertura numérica y el radio del núcleo de una fibra óptica de índice graduado de alfa única.

**[0071]** En el eje y de la izquierda se representa la apertura numérica del núcleo óptico ( $NA$ ) y en el eje x se representa el radio del núcleo óptico ( $a$ ). Los valores de las pérdidas de conexión acumuladas (expresadas en dB) correspondientes a una pareja de parámetros dada ( $NA$ ,  $a$ ) se ilustran en tonos de gris en el eje y de la derecha.

**[0072]** Las pérdidas de conexión acumuladas se miden a una longitud de onda de 850 nm, bajo condiciones de lanzamiento de modos múltiples para medir la atenuación definida en el estándar conocido de "flujo restringido" (IEC 61280-4-1). El principio de las condiciones de lanzamiento definido por la EF se recuerda en la figura 8. EF define la integral de la salida de potencia de la fibra óptica sobre el radio de la fibra.

**[0073]** Tal como se ilustra en la figura 7, para caracterizar las pérdidas de conexión acumuladas de acuerdo con las condiciones estándar EF, una fibra óptica 70 de acuerdo con la invención se somete a un impacto de haz de una fuente luminosa de modos múltiples 71 acoplada a la misma. El patrón de campo cercano del impacto de haz se observa a continuación en la salida de la fibra óptica por un receptor 72 y se procesa después para evaluar las pérdidas de conexión acumuladas en los niveles P1 y P2. En otras palabras, "pérdidas de conexión acumuladas" significa las pérdidas medidas acumuladas en las conexiones P1 y P2.

- 5 **[0074]** De la figura 6 se desprende que para pérdidas acumuladas aceptables, el radio del núcleo óptico  $a$  debe ser superior a 20  $\mu\text{m}$ . Si se elige el criterio de calidad  $C$  sea tal que  $|C| < 0,10$  por ejemplo, la apertura numérica será superior a 0,30. Con tales valores, la apertura numérica  $NA$  y el radio de núcleo óptico  $a$  satisfacen el criterio  $C$  de calidad definido según la ecuación (IV) anterior. Para completar la representación de la figura 6, se muestran en la tabla 2 siguiente algunos valores complementarios del radio de núcleo  $a$ , de la apertura numérica  $NA$  y del criterio  $C$  aplicados a fibras ópticas de acuerdo con la invención y se comparan las pérdidas acumuladas medidas.

$a$ ( $\mu\text{m}$ )	NA	C (a, NA)	Pérdida acumuladas (dB)
24	0,28	-0,20	1,0
19	0,28	-0,10	2,2
16,5	0,28	-0,05	3,1
27,5	0,35	-0,20	1,0
22,5	0,35	-0,10	1,4
20	0,35	-0,05	1,8

- 10 **[0075]** Se hace evidente que, para valores de  $NA$  de 0,35, las fibras ópticas de la invención permiten un mayor radio de núcleo que para cuando el valor de  $NA$  es 0,28, para los cuales se hace posible obtener pérdidas acumuladas reducidas.
- 15 **[0076]** Finalmente, además de mejorar las relaciones señal-ruido, el aumento de la apertura numérica de la fibra óptica lleva a obtener un mayor número de modos ópticos en longitudes de onda de modos múltiples. El número de modos ópticos guiados en la fibra, es función de la apertura numérica y el radio óptico del núcleo. En particular, el número de modos ópticos guiados puede determinarse mediante la siguiente ecuación:

$$N = \frac{\alpha}{\alpha + 2} \cdot a^2 \cdot \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot n_0^2 \cdot \Delta$$

donde:

- 20  $a$  es el radio del núcleo óptico,  
 $\Delta$  es la diferencia de índice de refracción normalizada, con

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

- 25  $\alpha$ , es un parámetro adimensional que define la forma de perfil de índice del núcleo óptico, comprendido entre 1,9 y 2,2,  
 $N$  es el número de modos ópticos.

**REIVINDICACIONES**

1. Fibra óptica que comprende un núcleo óptico y un revestimiento óptico que rodea el núcleo óptico, teniendo el núcleo óptico un perfil de índice de refracción graduado con un índice de refracción mínimo  $n_1$  y un índice de refracción máximo  $n_0$ , caracterizada porque tiene una apertura numérica  $NA$  y un radio de núcleo óptico  $a$  que satisfacen un criterio  $C$  de calidad de comunicaciones ópticas, definido por la siguiente ecuación:

$$C = NA - 0.02 \times a$$

10 donde:

$$NA = \sqrt{n_0^2 - n_1^2} = n_0 \cdot \sqrt{2\Delta} \quad \text{con} \quad \Delta = \frac{n_0^2 - n_1^2}{2 n_0^2}$$

15  $\Delta$  es la diferencia de índice de refracción normalizada y por que dichos índices de refracción mínimo y máximo  $n_1$ ,  $n_0$  y dicho radio de núcleo óptico  $a$ , se eligen de manera que  $NA > 0,20$ ,  $a > 10 \mu\text{m}$  y  $|C| < 0,20$ .

2. Fibra óptica de acuerdo con la reivindicación 1, en la que dichos índices de refracción mínimo y máximo  $n_1$ ,  $n_0$  y dicho radio de núcleo óptico  $a$ , se eligen de manera que  $|C| < 0,10$ .

20 3. Fibra óptica de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 o 2, en la que dichos índices de refracción mínimo y máximo  $n_1$ ,  $n_0$  y dicho radio de núcleo óptico  $a$ , se eligen de manera que  $|C| < 0,05$ .

4. Fibra óptica de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 3, en la que dichos índices de refracción mínimo y máximo  $n_1$ ,  $n_0$  y dicho radio de núcleo óptico  $a$ , se eligen de manera que  $C < 0$ .

25 5. Fibra óptica de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 4, en la que dicho radio de núcleo óptico  $a > 14 \mu\text{m}$  y más particularmente  $a > 19 \mu\text{m}$ , y aún más particularmente  $a = 25 \mu\text{m}$ .

30 6. Fibra óptica de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 5, en la que dichos índices de refracción mínimo y máximo  $n_1$ ,  $n_0$ , se eligen de manera  $NA > 0,25$ , y más particularmente  $NA > 0,30$ , y aún más particularmente  $NA > 0,34$ .

35 7. Fibra óptica de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 6, en la que el perfil de índice de refracción graduado es un perfil de índice de refracción graduado de alfa única  $n(r)$ , definido por la siguiente ecuación

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

donde:

40  $r$  es una variable representativa del radio de dicha fibra óptica,  $\alpha \leq 1$ , siendo  $\alpha$  un parámetro adimensional que define la forma de perfil de índice del núcleo óptico.

45 8. Fibra óptica de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 6, en la que el núcleo óptico comprende un núcleo óptico interno y un núcleo óptico externo que rodea el núcleo óptico interno, y en la que el perfil de índice de refracción graduado es un perfil de índice graduado de alfa doble  $n(r)$ , definido por la siguiente ecuación:

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

donde

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

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

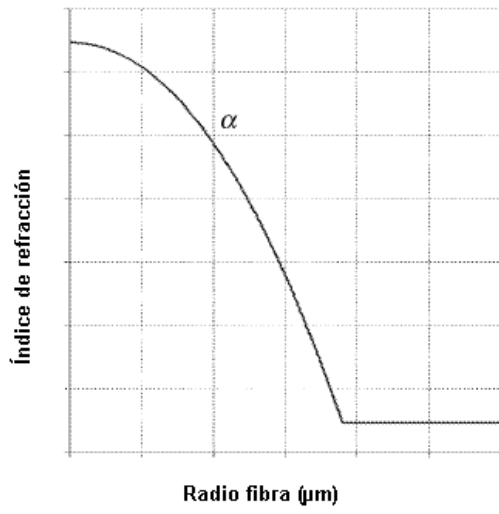
$$n_1' = \frac{n_1}{\sqrt{1 - 2\Delta}}$$

$$n_2' = n_1 \cdot \sqrt{\frac{(1 - 2\Delta) \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \left(\frac{r_t}{a}\right)^{\alpha_2} - \alpha_1}{(1 - 2\Delta) \cdot \left( (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \left(\frac{r_t}{a}\right)^{\alpha_2} - \alpha_1 \right)}}$$

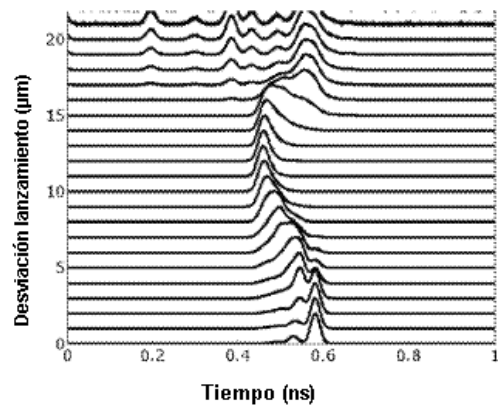
- 5 r es una variable representativa del radio de dicha fibra óptica,  
 $r_t$  es el radio del núcleo óptico interno,  
 $n_1'$  es el índice de refracción máximo del núcleo óptico interno,  
 $n_2'$  es el índice de refracción máximo del núcleo óptico externo,  
10  $\Delta_1$  es la diferencia de índice de refracción normalizada respecto del núcleo óptico interno,  
 $\Delta_2$  es la diferencia de índice de refracción normalizada respecto del núcleo óptico externo,  
 $\alpha_1 \geq 1$ , siendo  $\alpha_1$  un parámetro adimensional que define la forma de perfil de índice del núcleo óptico interno,  
15  $\alpha_2 \geq 1$ , siendo  $\alpha_2$  un parámetro adimensional que define la forma de perfil de índice del núcleo óptico externo,

9. Fibra óptica de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 8, en la que el revestimiento óptico comprende una zanja deprimida que rodea el núcleo óptico.

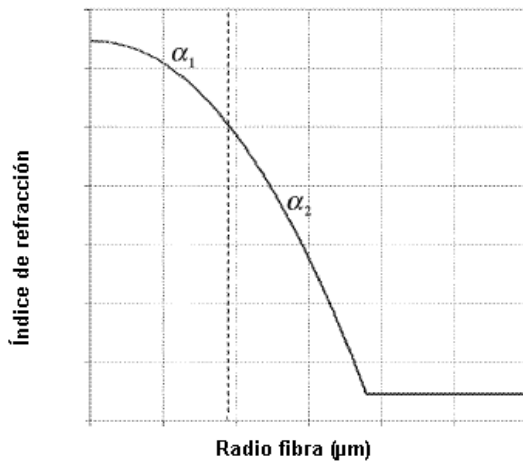
- 20 10. Sistema óptico que comprende, al menos, una fibra óptica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9.



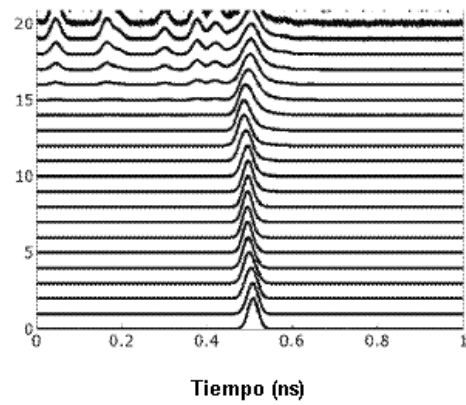
**Figura 1A**



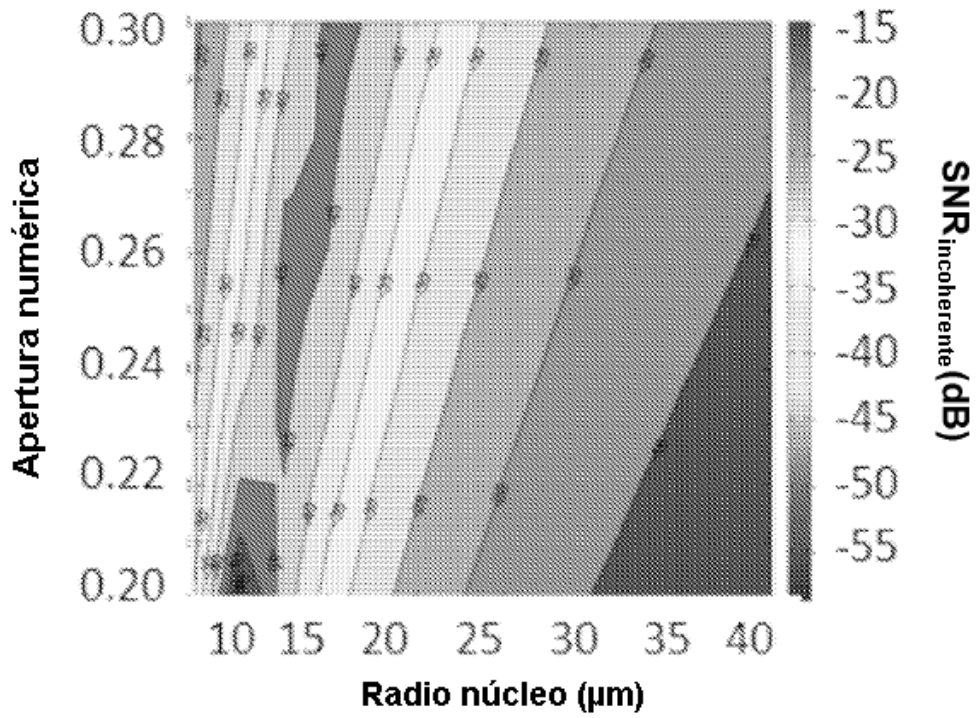
**Figura 1B**



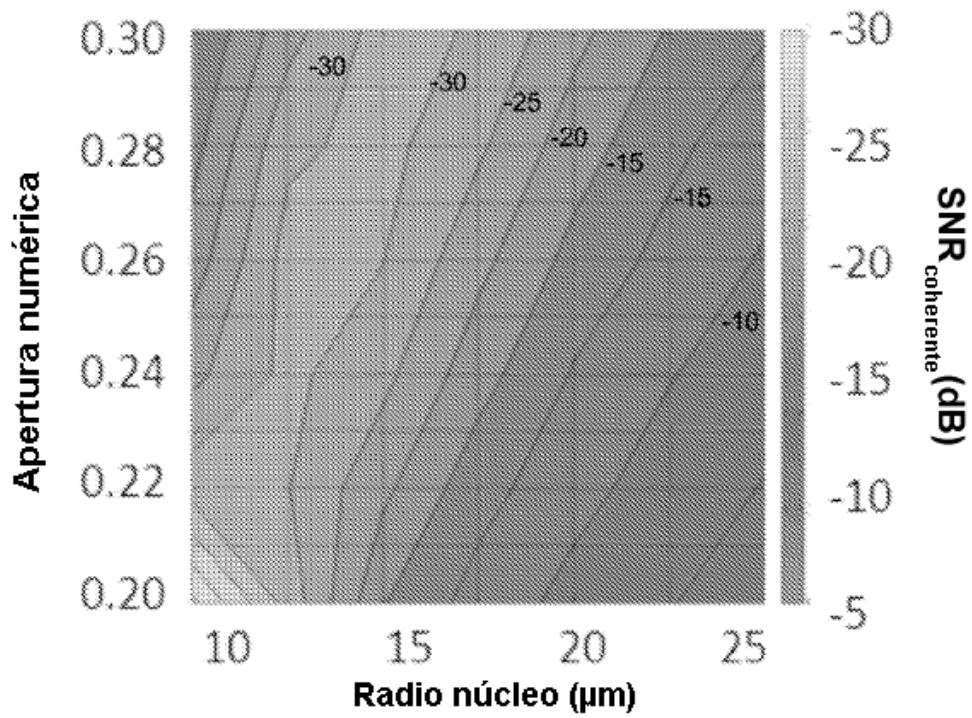
**Figura 2A**



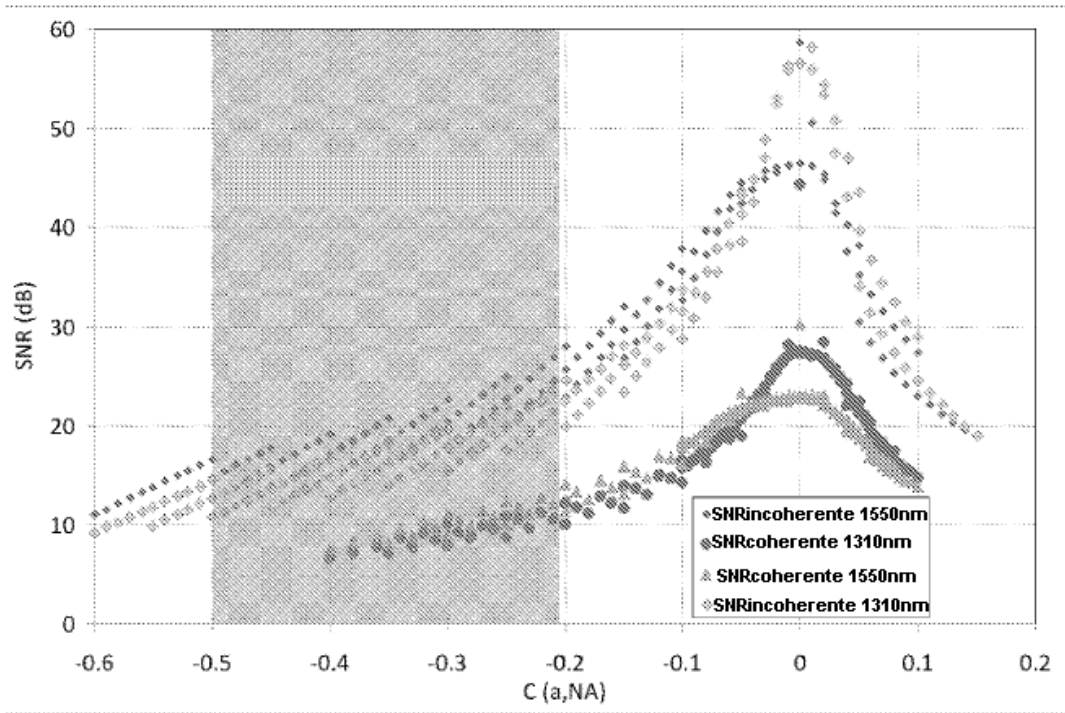
**Figura 2B**



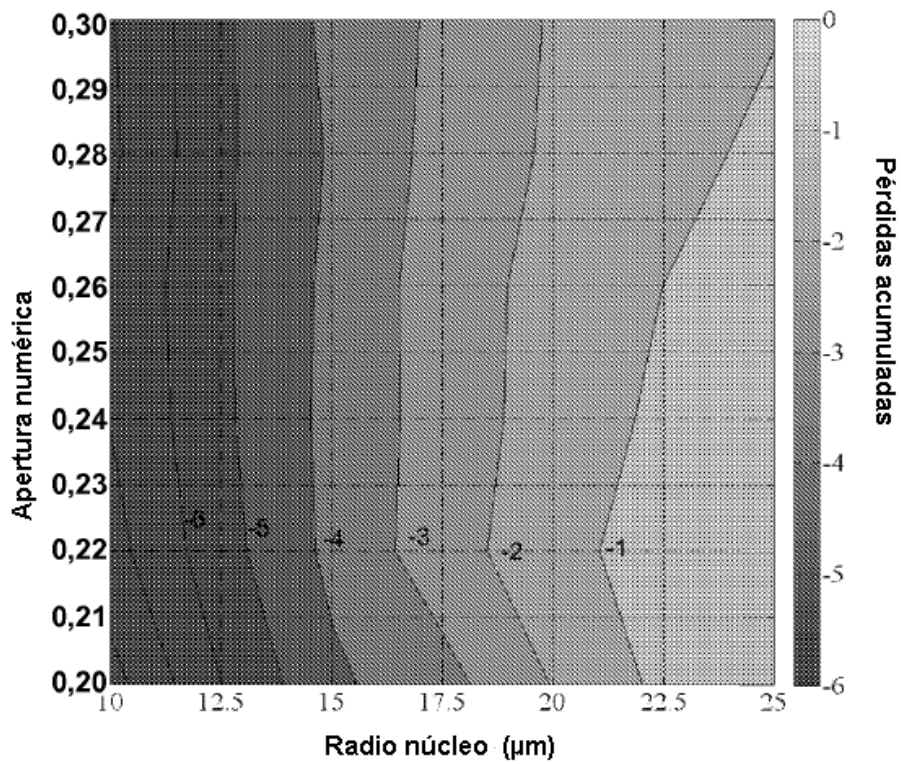
**Figura 3**



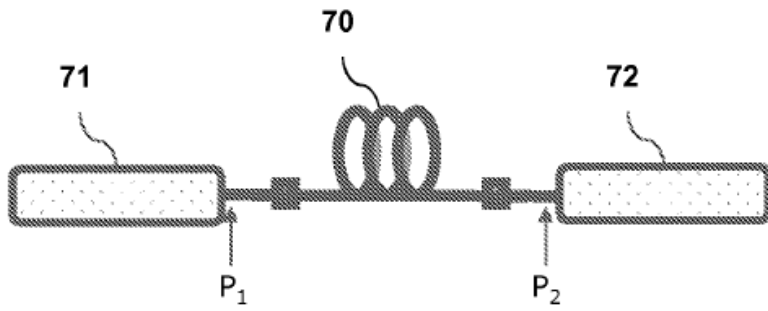
**Figura 4**



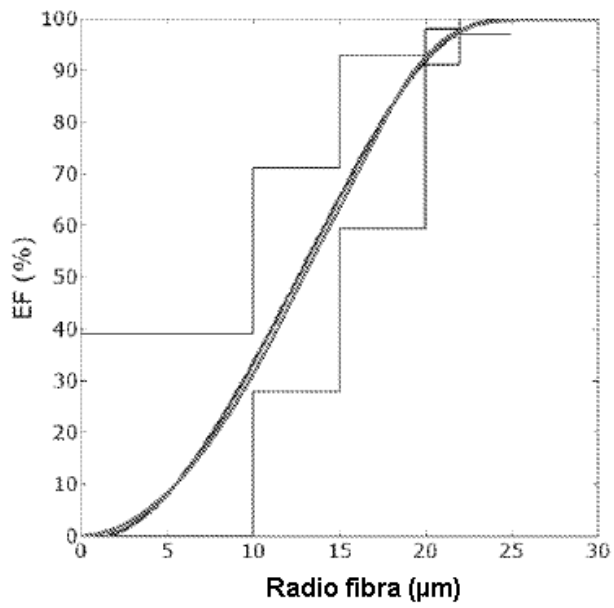
**Figura 5**



**Figura 6**



**Figura 7**



**Figura 8**



**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**

10

• AU 2002100296 [0016]

• FR 2441858 [0017]