

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 796 332**

51 Int. Cl.:

G02B 6/028 (2006.01)

G02B 6/036 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **08.02.2016 PCT/IB2016/001018**

87 Fecha y número de publicación internacional: **17.08.2017 WO17137793**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **08.02.2016 E 16750999 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.04.2020 EP 3414605**

54 Título: **Fibras ópticas de pocos modos para multiplexado por división de modos**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
26.11.2020

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

SILLARD, PIERRE;
MOLIN, DENIS y
BIGOT, MARIANNE

74 Agente/Representante:

ARPE FERNÁNDEZ, Manuel

ES 2 796 332 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

Fibras ópticas de pocos modos para multiplexado por división de modos

5 CAMPO DE LA INVENCION

[0001] La presente revelación se refiere al campo de transmisión por fibra óptica, y, más específicamente a diseños mejorados de fibra de pocos modos para multiplexado por división de modos.

10 ANTECEDENTES

[0002] Una fibra óptica está constituida convencionalmente por un núcleo óptico, que transmite una señal óptica, y por un revestimiento óptico, que confina la señal óptica dentro del núcleo óptico. Para ello, el índice de refracción del núcleo, n_0 , es mayor que el del revestimiento, n_{cl} . Una fibra óptica generalmente se caracteriza 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 , mientras que la diferencia Δn entre el índice de refracción en el radio r , $n(r)$ y el índice de refracción del revestimiento óptico n_{cl} 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 pueden propagarse simultáneamente a lo largo de la fibra óptica, mientras que en una fibra de modo único, los modos de orden superior (en adelante denominados HOM) son cortados o altamente atenuados.

[0004] Las fibras de modo único se utilizan comúnmente para aplicaciones de larga distancia, tales como redes de acceso, redes metropolitanas o redes de larga distancia. 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 μm y 15 μm). Para cumplir con los requisitos de las aplicaciones de alta velocidad o alta tasa binaria (por ejemplo, 10 Gbps), las fibras estándar de modo único requieren la utilización de un emisor láser de modo único modulado sintonizado para funcionar típicamente a una longitud de onda de 1550 nm. Sin embargo, las fibras de modo único sufren problemas de falta de linealidad, que son limitaciones importantes en la capacidad de transmisión de la fibra.

[0005] Las fibras de modos múltiples se usan comúnmente para aplicaciones de corta distancia que requieren un gran ancho de banda, como redes de área local (LAN), unidades de viviendas múltiples (MDU) y centros de datos, más generalmente conocidos como redes de edificios. El núcleo de una fibra de modos múltiples tiene típicamente un diámetro de 50 μm , o 62,5 μm . Las fibras de modos múltiples más frecuentes en telecomunicaciones son las fibras ópticas de perfil de índice de refracción de gradiente. Para minimizar la dispersión intermodal (es decir, la diferencia entre los tiempos de retardo de propagación o la velocidad de grupo de los modos ópticos a lo largo de la fibra óptica, también denominada DMGD por "retardo de grupo de modo diferencial"), dicho perfil de índice de refracción garantiza un ancho de banda modal alto para una longitud de onda dada.

[0006] Puesto que el tráfico de datos a través de redes de fibra óptica continúa creciendo exponencialmente, existe una demanda creciente de aumentar el tráfico por fibra, particularmente a través de largas distancias. Con este fin, se han desarrollado técnicas de multiplexación que permiten que una pluralidad de flujos de datos separados, compartan la misma fibra óptica. Entre estas técnicas, un enfoque prometedor es la multiplexación por división espacial (SDM), en la que una pluralidad de modos de señal óptica guiados por la fibra, proporcionan una pluralidad de canales de datos dentro de una sola fibra óptica.

[0007] Dicha técnica ha requerido el desarrollo de nuevos tipos de fibras ópticas, llamadas fibras ópticas de pocos modos, que soportan más de un modo espacial pero menos modos espaciales que las fibras de múltiples. Dichas fibras de pocos modos que se analizan particularmente en el documento de patente PCT WO2011/094400, admiten 2 o más modos LP.

[0008] Las transmisiones multiplexadas por división espacial que utilizan fibras de pocos modos (FMF) han recibido recientemente una atención considerable debido a su potencial para multiplicar la capacidad de las transmisiones de modo único por el número de modos que se utilizarán.

[0009] Un enfoque para el diseño de fibras de pocos modos consiste en minimizar los retardos de grupo de modo diferencial (DMGD, es decir, la diferencia en los tiempos de llegada respectivos de los modos guiados utilizados para la multiplexación espacial), de manera que todos los modos se puedan detectar simultáneamente utilizando $2N \times 2N$ complejos (siendo N el número total de modos espaciales, es decir, incluye degeneraciones de modo LP (polarización lineal)) técnicas de entrada múltiple-salida múltiple (MIMO), independientemente de fenómenos de acoplamiento que es uno de los factores limitantes para un puenteo en largas distancias. Con este enfoque, se requiere un diseño cuidadoso de la FMF para reducir el DMGD (preferiblemente por debajo de 300 ps/km para preservar la eficiencia de MIMO) mientras se proporcionan bajas pérdidas por curvatura para todos los modos LP guiados.

[0010] Sin embargo, esta optimización se vuelve cada vez más difícil cuando aumenta el número de modos LP. Hasta ahora, solo se han reportado FMF que admiten hasta 20 modos LP utilizables con retardos de grupo de modo diferenciales bajos (DMGD).

[0011] En "Fibras de modos múltiples de 50 μm para multiplexación por división de modo" (proc. Ecoc 4.2.1 - 2015), P. Sillard y colaboradores divulgan fibras de modos múltiples de núcleo de índice de gradiente de 50 μm de diámetro, que se pueden adaptar a transmisiones multiplexadas por división de modo que usan procesamiento de señal digital MIMO y multiplexación de modo selectivo. Dichas fibras se realizaron y caracterizaron y se compararon con fibras de pocos modos con retardo de grupo de modo diferencial bajo.

[0012] La figura 1 ilustra la diferencia del índice de refracción con respecto al radio de tal FMF con un diámetro de núcleo de 50 µm que soporta 30 modos LP a 1550 nm pero en la que solo 20 modos LP son utilizables. En realidad, una degradación severa de las pérdidas por curvatura impide la utilización de los grupos de modo noveno y décimo en sistemas multiplexados por división espacial para tales fibras.

[0013] El documento de patente US 2015/0168643 describe una fibra de pocos modos, que tiene un núcleo de índice de gradiente y un revestimiento circundante que comprende una capa entre el núcleo y la zanja, una zanja dopada descendente que linda con la capa y una región de revestimiento sin dopar colindando con la zanja. El perfil de índice de refracción de la fibra está configurado para admitir entre 9 y 20 modos LP para la transmisión de una señal óptica espacialmente multiplexada. Los modos no deseados tienen índices efectivos respectivos que son próximos o menores que el índice de revestimiento para dar como resultado la fuga de los modos no deseados en el revestimiento exterior. La separación de índice entre el modo deseado que tiene el índice efectivo más bajo y el modo con fugas con el índice efectivo más alto es lo suficientemente grande como para evitar sustancialmente el acoplamiento mutuo.

[0014] Aunque tales diseños son prometedores, no permiten soportar 25 o 30 modos LP utilizables mientras los retardos de grupo de modo diferencial se reduzcan tanto como se desee. Además, los perfiles divulgados en ambos documentos no están optimizados para garantizar bajas pérdidas por curvatura, que, sin embargo, son obligatorias para las FMF.

[0015] En consecuencia, existe la necesidad de diseños para fibras ópticas de pocos modos que guíen un mayor número de modos soportados (25 o más modos LP), con pequeños retardos de grupo de modo diferencial entre cualquier combinación de modos guiados LP (preferiblemente por debajo de 200 ps/km) y bajas pérdidas por curvatura (preferiblemente por debajo de 100 dB/vuelta para 10 mm de radio de curvatura).

SUMARIO DE LA INVENCION

[0016] En una realización particular de la presente revelación, se propone una fibra óptica que comprende un núcleo óptico central rodeado por un revestimiento óptico. El núcleo óptico tiene un perfil de índice de gradiente $n(r)$ en α , con α comprendido entre 1 y 3, siendo α un parámetro adimensional que define una forma del perfil de índice de dicho núcleo óptico, que es una función de una distancia radial r desde el centro de dicho núcleo óptico. El núcleo óptico tiene un índice de refracción máximo n_0 y un radio exterior R_{1b} con una diferencia de índice de refracción $Dn_{1b} = n(R_{1b}) - n_{Cl}$ con respecto a dicho revestimiento óptico que tiene en su borde exterior un índice de refracción n_{Cl} . El núcleo óptico también tiene un radio R_1 , tal que $n(R_1) = n_{Cl}$, comprendido entre 21,5 µm y 27 µm y una diferencia máxima de índice de refracción $Dn_1 = n_0 - n_{Cl}$ entre $12,5 \times 10^{-3}$ y 20×10^{-3} , siendo dicha diferencia de índice de refracción determinada para $\lambda = \lambda_C$, donde λ_C es una longitud de onda de transmisión central de una banda de funcionamiento a la cual está destinada dicha fibra óptica.

[0017] Además, el revestimiento óptico comprende:

- una región deprimida con índice de refracción n_{trench} , llamada zanja, que rodea el núcleo óptico, teniendo dicha zanja un radio exterior R_3 entre 30 µm y 42 µm, y una diferencia de índice de refracción $Dn_3 = n_{trench} - n_{Cl}$ entre la zanja y el revestimiento comprendido entre -15×10^{-3} y -6×10^{-3} ;

- una región intermedia de índice de refracción deprimido, llamada zanja intermedia, que rodea el núcleo óptico, teniendo dicha zanja intermedia un radio exterior R_2 , con $R_{1b} < R_2 < R_3$, y una diferencia de índice de refracción Dn_2 entre la zanja intermedia y el revestimiento, con $Dn_3 < Dn_2 < 0$.

Dicha fibra óptica es tal que:

- para $|Dn_{1b} - Dn_2| \geq 0,5 \times 10^{-3}$, $Min(Dn_{1b}, Dn_2) \leq -1,5 \times 10^{-3}$, y
- para $|Dn_{1b} - Dn_2| < 0,5 \times 10^{-3}$, Dn_2 se encuentra entre -5×10^{-3} y $-3,5 \times 10^{-3}$.

[0018] Como se utiliza en este documento, y a menos que se especifique lo contrario, el término "perfil de índice de gradiente en α " se refiere a un núcleo óptico que tiene un perfil de índice de refracción $n(r)$ definido como sigue:

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

donde:

r es una variable representativa del radio de la fibra óptica, siendo R_{1b} el radio exterior del núcleo óptico

donde:

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

Δ es la diferencia de índice de refracción normalizada con

n_1 el índice de refracción mínimo del núcleo óptico,

n_0 es índice de refracción máximo del núcleo óptico

α es un parámetro adimensional que define la forma del perfil de índice del núcleo óptico.

Un parámetro alfa $\alpha = 2$ corresponde a una parábola invertida. Un parámetro alfa $\alpha = 1$ corresponde a una forma triangular, mientras que un parámetro alfa $\alpha = \infty$ corresponde a una función de escalón.

[0019] Dicha fibra óptica FMF muestra un diámetro de núcleo mayor, en comparación con las fibras FMF de la técnica anterior, lo que permite soportar un mayor número de modos LP. Además, comprende una zanja deprimida, lo que conduce a disminuir las pérdidas por macro curvatura, mejorando el confinamiento de los modos ópticos

dentro del núcleo. Tal diseño permite así mejorar significativamente la compensación entre DMGD y pérdidas por curvatura.

[0020] Por último, una fibra óptica FMF de este tipo presenta una interfaz cuidadosamente diseñada entre el núcleo de índice de gradiente y la zanja, lo que permite mantener bajos los DMGD entre cualquier combinación de modos guiados LP y al mismo tiempo mantener bajas las pérdidas por curvatura de cualquier modo guiado LP.

[0021] De acuerdo con una realización, una fibra óptica tal tiene una frecuencia normalizada $V = \frac{2\pi R_1}{\lambda_c} \sqrt{n_0^2 - n_{Cl}^2}$ de entre 18,4 y 23

[0022] Según una realización, dicha fibra óptica guía al menos 25 modos LP.

[0023] Según otra realización, dicha fibra óptica guía al menos 30 modos LP.

[0024] Una cantidad tan alta de modos guiados permite aumentar la capacidad de un sistema óptico que comprende una fibra óptica de pocos modos, y responde a la demanda de mayor ancho de banda en sistemas de transmisión óptica de larga distancia.

[0025] Una fibra de pocos modos de acuerdo con una realización de la presente descripción, por lo tanto, guía un mayor número de modos LP que pueden usarse eficazmente en transmisiones multiplexadas por división espacial, en comparación con las FMF de la técnica anterior.

[0026] Según una realización adicional, $Max|DMGDs| < 200$ ps/km para $\lambda = \lambda_c$, donde λ_c es una longitud de onda de transmisión central de una banda de funcionamiento a la cual está destinada dicha fibra óptica, donde $DMGD$ es el retardo de grupo de modo diferencial entre dos modos guiados en dicha fibra óptica, y donde $Max|DMGDs|$ es el máximo del valor absoluto de $DMGD$ entre cualquier combinación de modos guiados. El $DMGD$ se puede caracterizar, por ejemplo, utilizando el procedimiento estándar de medición de retardo de modo diferencial de fibras de modos múltiples, es decir, la medición de las respuestas de pulsos de la fibra para lanzamientos de modo único que barren radialmente el núcleo de la fibra (un lanzamiento centrado excita los modos de orden modo más bajo, mientras que los grandes lanzamientos de desplazamiento excitan los modos de orden más alto).

[0027] Según aún otra realización, $Max|DMGDs| < 500$ ps/km para $\lambda \notin [\lambda_c - \delta\lambda; \lambda_c + \delta\lambda]$, donde λ_c es una longitud de onda de transmisión central de una banda de funcionamiento para la cual está destinada dicha fibra óptica y donde $2\delta\lambda$ es un ancho de dicha banda de funcionamiento.

[0028] Los retardos de grupo de modo diferenciales son, por lo tanto, muy bajos, mientras que se cumple el reto de aumentar el número de modos LP hasta 25 o 30.

[0029] Según una realización, el modo LP01 fundamental guiado por dicha fibra óptica tiene un área efectiva $A_{eff} > 150 \mu m^2$ a $\lambda = \lambda_c$. Tal área efectiva relativamente grande limita la falta de linealidad intramodal.

[0030] Según otra realización, $Max|BL| < 100$ dB/vuelta, preferiblemente < 50 dB/vuelta, para un radio de curvatura de 10 mm a $\lambda_c = \lambda_c$, donde BL son las pérdidas por curvatura de los diferentes modos guiados en dicha fibra óptica, y donde $Max|BL|$ es el valor absoluto máximo de BL para todos los modos guiados. BL puede caracterizarse, por ejemplo, midiendo la diferencia de pérdida de un modo determinado seleccionado por un multiplexor de modo e inyectado en la fibra de pocos modos con y sin aplicación de un bucle de radio de 10 mm utilizando un banco de atenuación espectral.

[0031] Una fibra de pocos modos de este tipo muestra, por lo tanto, una muy buena compensación entre las pérdidas por curvatura y los retardos de grupo de modo diferenciales.

[0032] Según una realización, $\lambda_c = 1550$ nm y $\delta\lambda = 20$ nm.

[0033] Se observa que las FMF hasta aquí descritas y en todo el resto del documento son adecuadas para su utilización, como mínimo, en toda la "banda C" (1530 nm - 1565 nm), pero también en algunos casos en la S- (1460 nm - 1530 nm), la L- (1565 nm - 1625 nm) y bandas U (1625 nm - 1675 nm). Los retardos de grupo de modo diferenciales de tales FMF son, por lo tanto, muy bajos en toda la banda C extendida.

[0034] Otro aspecto de la divulgación se refiere a un enlace óptico que comprende al menos una fibra óptica como se describió aquí anteriormente en cualquiera de sus realizaciones.

[0035] Un enlace óptico de este tipo puede comprender cualquier número de fibras ópticas concatenadas, siempre que una de ellas cumpla al menos con las características expuestas en la presente descripción. Dicho enlace óptico también puede comprender varias fibras ópticas, que cumplirían todas las características de la presente descripción.

[0036] De acuerdo con una realización se proporciona un enlace óptico que comprende N fibras ópticas con $N \geq 2$, siendo N un número entero, comprendiendo cada fibra óptica de índice $i \in \{1; N\}$, un núcleo óptico central y un revestimiento rodeando el núcleo óptico, teniendo el núcleo óptico un perfil de índice de gradiente en $\alpha_i n_i(r)$ con α_i comprendido entre 1 y 3, siendo α_i un parámetro adimensional que define una forma de perfil de índice del núcleo óptico que función de la distancia radial r desde el centro de dicho núcleo óptico, y teniendo el núcleo óptico un índice de refracción máximo n_{0i} , y un radio exterior R_{1bi} con una diferencia de índice de refracción $Dn_{1bi} = n_i(R_{1bi}) - n_{Cii}$ con respecto a dicho revestimiento óptico que tiene en su borde exterior un índice de refracción n_{Cii} , teniendo también dicho núcleo óptico un radio R_{1i} , en el que $n_i(R_{1i}) = n_{Cii}$ una diferencia de índice de refracción máxima $Dn_{1i} = n_{0i} - n_{Cii}$, comprendiendo dicho revestimiento externo:

- una región de índice de refracción deprimido $n_{trenchi}$, llamada zanja, que rodea el núcleo óptico, teniendo dicha zanja un radio exterior R_{3i} , y una diferencia de índice de refracción $Dn_{3i} = n_{trenchi} - n_{Cii}$ entre la zanja y el revestimiento;

- una región intermedia de índice de refracción deprimido, llamada zanja intermedia, que rodea el núcleo óptico, teniendo dicha zanja intermedia un radio exterior R_{2i} con $R_{1bi} < R_{2i} < R_{3i}$, y una diferencia de índice de refracción Dn_{2i} entre dicha franja intermedia y el revestimiento con $Dn_{3i} < Dn_{2i} < 0$,

[0037] Dicho un enlace óptico es tal que:

5

- un radio de núcleo óptico promedio R_{1link} para dicho enlace óptico está comprendido entre $21,5 \mu\text{m}$ y $27 \mu\text{m}$

donde $R_{1link} = \frac{\sum_{i=1}^N R_{1i} L_i}{\sum_{i=1}^N L_i}$ siendo L_i una longitud de la fibra óptica i de dicho enlace,

10

- una diferencia de índice de refracción máxima media Dn_{1link} para dicho enlace óptico se encuentra entre $12,5 \times 10^{-3}$ y 20×10^{-3}

donde $Dn_{1link} = \frac{\sum_{i=1}^N Dn_{1i} L_i}{\sum_{i=1}^N L_i}$, para $\lambda = \lambda_c$, donde λ_c es una longitud de onda de transmisión central de una

15

banda de funcionamiento para la que está destinada dicha fibra óptica,

- un radio exterior de zanja promedio R_{3link} para dicho enlace óptico comprendido entre $30 \mu\text{m}$ y $42 \mu\text{m}$ donde

$R_{3link} = \frac{\sum_{i=1}^N R_{3i} L_i}{\sum_{i=1}^N L_i}$, siendo L_i una longitud de la fibra óptica i de dicho enlace

20

- una diferencia de índice de refracción promedio entre la zanja y el revestimiento Dn_{3link} para dicho enlace

óptico se encuentra entre -15×10^{-3} y -6×10^{-3} para $\lambda = \lambda_c$, donde $Dn_{3link} = \frac{\sum_{i=1}^N Dn_{3i} L_i}{\sum_{i=1}^N L_i}$,

y:

- para $|Dn_{1blink} - Dn_{2link}| \geq 0,5 \times 10^{-3}$, $Min(Dn_{1blink}, Dn_{2link}) \leq -1,5 \times 10^{-3}$, y

25

- para $|Dn_{1blink} - Dn_{2link}| < 0,5 \times 10^{-3}$, estando comprendida Dn_{2link} entre -5×10^{-3} y $-3,5 \times 10^{-3}$.

donde $Dn_{2link} = \frac{\sum_{i=1}^N Dn_{2i} L_i}{\sum_{i=1}^N L_i}$

es la diferencia de índice de refracción promedio entre la zanja intermedia y el

revestimiento para dicho enlace óptico

30

y donde $Dn_{1blink} = \frac{\sum_{i=1}^N Dn_{1bi} L_i}{\sum_{i=1}^N L_i}$ es la diferencia de índice de refracción promedio entre el núcleo en su radio

exterior y el revestimiento para dicho enlace óptico, ambas para $\lambda = \lambda_c$, donde λ_c es una longitud de onda de transmisión central de una banda de funcionamiento para la se destina el enlace óptico.

35

[0038] Al elegir adecuadamente las longitudes respectivas de L_i de todas las fibras ópticas que constituyen el enlace óptico, es posible construir un enlace de fibra óptica de pocos modos, que permite guiar un mayor número de modos LP en comparación con las FMF de la técnica anterior, mientras se alcanza un retardo de grupo de modo diferencial más bajo. Tal enlace óptico es, por lo tanto, un enlace FMF compensado en DMGD y puede mostrar propiedades mejoradas a causa de las FMF individuales comprendidas en dicho enlace óptico. Tal DMGD bajo permite que todos los modos se detecten simultáneamente usando $2N \times 2N$ (N es el número total de modos espaciales, es decir, que incluye degeneraciones del modo LP) técnicas MIMO ("Entrada múltiple, salida múltiple"), independientemente de fenómenos de acoplamiento de modo. El alcance del sistema aumenta así con respecto a la técnica anterior.

45

[0039] Un enlace óptico de este tipo muestra propiedades similares a las descritas anteriormente en relación con la fibra óptica FMF, especialmente en términos de número de modos LP soportados y valores bajos de DMGD. Las fibras ópticas comprendidas en este enlace óptico muestran zanjias deprimidas, lo que permite disminuir las pérdidas por macro curvatura al mejorar el confinamiento de los modos ópticos dentro del núcleo.

[0040] Según una realización, dicho enlace óptico tiene una frecuencia normalizada

$V_{link} = \frac{2\pi R_{1link}}{\lambda_c} \sqrt{n_{0link}^2 - n_{c1link}^2}$ comprendida entre 18,4 y 23, donde $n_{0link} = \frac{\sum_{i=1}^N n_{0i} L_i}{\sum_{i=1}^N L_i}$ es el índice de

50

refracción máximo promedio del núcleo de dicho enlace óptico, y donde $n_{c1link} = \frac{\sum_{i=1}^N n_{c1i} L_i}{\sum_{i=1}^N L_i}$ es el índice de refracción máximo promedio del revestimiento para dicho enlace óptico.

[0041] Según una realización, dicho enlace óptico guía al menos 25 modos LP.

[0042] Según una realización, dicho enlace óptico guía al menos 30 modos LP.

[0043] Según otra realización, para todas las fibras ópticas $i \in \{1; N\}$, en dicho enlace, dichas longitudes L_i se eligen para minimizar $Max|DMGD_{link}|$ en dicho enlace, donde $DMGD_{link}$ es el retardo de grupo de modo diferencial entre dos modos guiados de dicho enlace óptico, y donde $Max|DMGD_{link}|$ es el valor absoluto máximo del retardo de grupo de modo diferencial entre cualquier combinación de modos guiados en dicho enlace óptico.

[0044] Según aún otra realización, al menos dos fibras ópticas en dicho enlace tienen $DMGD_i$ que muestra signos opuestos para al menos un modo guiado por dichas fibras ópticas, donde $DMGD_i$ es el retardo de grupo de modo diferencial entre dicho modo y cualquier otro guiado modo en fibra óptica i .

[0045] Por lo tanto, dicho enlace óptico puede formarse con fibras ópticas que cumplen los criterios establecidos anteriormente en relación con la fibra óptica de acuerdo con las realizaciones de la divulgación, pero difieren entre sí dentro de una cierta tolerancia y muestran retardos de grupo de modo diferenciales con signos opuestos, que pueden compensarse mutuamente una vez ensambladas en un enlace óptico. Una tolerancia de $\pm 0,5 \times 10^{-3}$ en las diferencias de índice de refracción, $\pm 0,5 \mu m$ en los radios de la fibra y de $\pm 0,02$ en α , es aceptable para las fibras ópticas que forman dicho enlace óptico.

[0046] Según una realización, $Max|DMGD_{link}| < 200$ ps/km a $\lambda = \lambda_c$, donde λ_c es una longitud de onda de transmisión central de una banda de funcionamiento a la cual está destinada dicha fibra óptica.

[0047] Según otra realización, $Max|DMGD_{link}| < 500$ ps/km para $\lambda \in [\lambda_c - \delta\lambda; \lambda_c + \delta\lambda]$, donde λ_c es una longitud de onda de transmisión central de una banda de funcionamiento para la cual está destinada dicha fibra óptica y donde $2\delta\lambda$ es un ancho de dicha banda de funcionamiento.

[0048] Según aún otra realización, $Max|BL_{link}| < 100$ dB/vuelta, preferiblemente < 50 dB/vuelta, con un radio de curvatura de 10 mm a $\lambda = \lambda_c$, donde BL_{link} son las pérdidas por curvatura de los diferentes modos guiados en dicho enlace óptico, y donde $Max|BL_{link}|$ es el máximo del valor absoluto de BL_{link} para todos los modos guiados en dicho enlace óptico.

[0049] Preferentemente, $\lambda_c = 1550$ nm y $\delta\lambda = 20$ nm.

[0050] La presente revelación también se refiere a un enlace óptico que comprende N fibras ópticas, con $N > 2$, siendo N un número entero. Cada fibra óptica cumple con los requisitos establecidos anteriormente de acuerdo con las realizaciones de la presente divulgación. Cualquiera de las dos fibras ópticas elegidas entre las N fibras ópticas que forman el enlace óptico tienen diferencias de índice de refracción Dn_1 y/o Dn_2 y/o Dn_3 para λ_c con valores que difieren en un máximo de $\pm 0,5 \times 10^{-3}$ y/o radios R_1 y/o R_{1b} y/o R_2 y/o R_3 con valores que difieren en un máximo de $\pm 0,5 \mu m$. Además, al menos dos de dichas fibras ópticas N tienen $DMGD$ con signos opuestos, donde $DMGD$ es el retardo de grupo de modo diferencial entre dos modos guiados en dicha fibra óptica.

[0051] Por lo tanto, dicho enlace óptico puede formarse con fibras ópticas, que no son exactamente idénticas y muestran retardos de grupo de modo diferenciales con signos opuestos, que pueden compensarse mutuamente una vez ensambladas en un enlace óptico. Tal enlace óptico es, por lo tanto, un enlace compensado en $DMGD$. Además, también es aceptable una tolerancia de $\pm 0,02$ sobre el α , entre cualquier combinación de fibras ópticas que formen el enlace óptico.

[0052] Otro aspecto de la divulgación se refiere a un sistema óptico que comprende al menos una fibra óptica o al menos un enlace óptico como se describió aquí anteriormente en cualquiera de sus realizaciones.

LISTA DE FIGURAS

[0053] Otras características y ventajas de las realizaciones de la presente descripción resultarán a partir de la siguiente descripción, dada a modo de ejemplos indicativos y no exhaustivos y de los dibujos adjuntos, en los cuales:

- La figura 1 proporciona gráficamente el perfil de índice de refracción de una fibra óptica FMF de la técnica anterior que admite 30 modos LP a 1550 nm pero en la que solo se pueden usar 20 modos LP;
- La figura 2 representa esquemáticamente una vista isométrica de una fibra óptica FMF ejemplar de acuerdo con una o más realizaciones descritas en el presente documento;
- La figura 3 proporciona gráficamente el perfil ilustrativo del índice de refracción de las fibras ópticas FMF de acuerdo con las realizaciones de la presente revelación;
- La figura 4 proporciona gráficamente el perfil de índice de refracción de dos fibras ópticas FMF ejemplares de acuerdo con las realizaciones de la presente revelación;
- La figura 5 proporciona gráficamente el perfil de índice de refracción de otras dos fibras ópticas FMF ejemplares de acuerdo con las realizaciones de la presente revelación;
- La figura 6 ilustra un enlace óptico de acuerdo con una realización de la presente revelación;
- Las figuras 7A y 7B ilustran realizaciones de un sistema óptico de acuerdo con la presente revelación.

[0054] Los componentes en las figuras no están necesariamente a escala, sino que se pone énfasis en ilustrar los principios de la presente descripción.

DESCRIPCIÓN DETALLADA

[0055] El principio general de la presente descripción es proponer una fibra óptica de pocos modos con índice de gradiente asistida por zanjas, cuidadosamente diseñada, que muestre un retardo de grupo de modo diferencial reducido y que admita más modos LP respecto de las FMF de la técnica anterior. Más precisamente, el propósito de tal diseño es optimizar la interfaz entre el núcleo de índice de gradiente y la zanja, para aumentar el número de

modos LP admitidos hasta 25 o 30, mientras se mantiene bajo el retardo de grupo de modo diferencial entre cualquier combinación de modos guiados LP, preferiblemente por debajo de 200 ps/km, y manteniendo bajas las pérdidas por curvatura de cualquier modo guiado LP, preferiblemente por debajo de 100 dB/vuelta para un radio de curvatura de 10 mm.

5 **[0056]** La luz que viaja por una fibra óptica en realidad forma modos de tipo híbrido, que generalmente se denominan modos LP (polarización lineal). Los modos LP_{0p} tienen dos grados de libertad de polarización y son dos veces degenerados, los modos LP_{mp} con $m \geq 1$ son cuatro veces degenerados. Estas degeneraciones no se cuentan al designar el número de modos LP que se propagan en la fibra. Por lo tanto, una fibra óptica de pocos modos que tiene dos modos LP soporta la propagación de todos los modos LP₀₁ y LP₁₁, o una fibra de pocos modos que guía 6 modos LP de guía de fibra de pocos modos soporta la propagación de todos los modos LP₀₁, LP₁₁, LP₀₂, LP₂₁, LP₁₂ y LP₃₁.

[0057] Ahora se hará referencia en detalle a realizaciones de fibras ópticas de modo reducido, cuyos ejemplos se ilustran en los dibujos adjuntos. Siempre que sea posible, se utilizarán los mismos números de referencia en todos los dibujos para referirse a las mismas partes o partes similares.

15 **[0058]** En la figura 2 se representa en una vista isométrica una realización de una fibra óptica de pocos modos según la presente divulgación. La fibra óptica 20 generalmente tiene un núcleo de vidrio 21 rodeado por un revestimiento de vidrio. Más precisamente, la fibra óptica 20 comprende cuatro regiones concéntricas contiguas, a saber:

- un núcleo 21 de índice de gradiente, con un radio exterior R_{1b} ;
- una zanja intermedia 22, con un radio interior R_{1b} y un radio exterior R_2 ;
- una zanja 23, con un radio interior R_2 y un radio exterior R_3 ;
- un revestimiento exterior 24, con un radio interior R_3 y un radio exterior R_4 y un índice de refracción n_{cl} .

Los radios de la zanja intermedia 22 y de la zanja 23 son tales que $R_{1b} < R_2 < R_3$.

25 **[0059]** En las realizaciones de la presente descripción, el núcleo de vidrio 21 generalmente tiene un radio R_1 con una diferencia de índice de refracción cero (es decir, $n(R_1) = n_{cl}$), de aproximadamente 21,5 μm a aproximadamente 27 μm . Además, la zanja tiene un radio exterior R_3 entre 30 μm y 42 μm . En las realizaciones mostradas y descritas aquí, el núcleo 21 y el revestimiento generalmente constan de sílice, específicamente vidrio de sílice. La sección transversal de la fibra óptica 20 puede ser generalmente simétrica circular con respecto al centro del núcleo 21. En algunas realizaciones descritas aquí, el radio R_4 (es decir, el radio de la porción de vidrio de la fibra óptica 10) es aproximadamente 62,5 μm . Sin embargo, debe entenderse que las dimensiones del revestimiento pueden ajustarse de modo que el radio R_4 pueda ser mayor o menor que 62,5 μm . La fibra óptica 20 también comprende un recubrimiento que rodea el revestimiento. Tal recubrimiento puede comprender varias capas, y puede ser especialmente un recubrimiento de doble capa, aunque estas diferentes capas no se muestran en la figura 2.

35 **[0060]** Las diferentes porciones en el revestimiento pueden consistir en vidrio de sílice puro (SiO₂), vidrio de sílice con uno o más dopantes, que aumenten el índice de refracción (por ejemplo, GeO₂ o cualquier otro dopante conocido), como cuando la porción del revestimiento está "dopada ascendentemente", o vidrio de sílice con un dopante, que disminuya el índice de refracción, tal como el flúor, como cuando la porción del revestimiento está "dopada descendentemente" (por ejemplo, para la zanja intermedia 22 o para la zanja 23).

40 **[0061]** Aunque no se ilustra en la figura 2, el revestimiento exterior 24 también puede comprender otras porciones o capas de índices de refracción inferiores o superiores, para $r > R_3$.

[0062] También debe señalarse que, en algunas realizaciones, es posible que $R_1 = R_{1b}$.

45 **[0063]** La figura 3 representa el perfil de índice de refracción $n(r)$ de la fibra óptica 20 de acuerdo con una realización de la presente descripción. Describe la relación entre el valor del índice de refracción n y la distancia r desde el centro de la fibra óptica. El eje x representa la posición radial con $x = 0$ representando el centro de la región central, y el eje y representa el índice de refracción, expresado como una diferencia de índice Dn a menos que se indique lo contrario. A lo largo de este documento, las diferencias del índice de refracción se determinan en $\lambda = \lambda_C$, donde λ_C es una longitud de onda de transmisión central de una banda de funcionamiento a la cual está destinada dicha fibra óptica. Por ejemplo, $\lambda_C = 1550\text{nm}$.

50 **[0064]** En esta realización, la fibra óptica 20 tiene un núcleo óptico 21 con un perfil de índice de refracción $n(r)$ definido como sigue:

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

donde:

r es una variable representativa del radio de la fibra óptica, R_{1b} es el radio exterior del núcleo óptico

55 Δ es la diferencia de índice de refracción normalizada
$$\Delta = \frac{n_0^2 - n_1^2}{2n_0^2}$$

n_1 es el índice de refracción mínimo del núcleo óptico, n_0 es el índice de refracción máximo del núcleo óptico,

α es un parámetro adimensional que define la forma del perfil de índice del núcleo óptico.

60 **[0065]** El perfil de índice de refracción en alfa del núcleo óptico 21, permite reducir la dispersión intermodal de la fibra óptica 20. El núcleo óptico 21 tiene un radio R_1 , en el que la diferencia del índice de refracción del núcleo con respecto al revestimiento es igual a cero, ya que $n(R_1) = n_{cl}$, siendo n_{cl} el índice de refracción del revestimiento

exterior. El núcleo óptico 21 también tiene una diferencia máxima de índice de refracción con el revestimiento exterior 24 $Dn_1 = n_0 - n_{Cl}$ comprendida entre $12,5 \times 10^{-3}$ y 20×10^{-3} .

[0066] En su radio exterior R_{1b} , el núcleo central óptico 21 muestra una diferencia de índice de refracción $Dn_{1b} = n(R_{1b}) - n_{Cl}$ con el revestimiento exterior 24. Por lo tanto, en realizaciones donde $R_{1b} > R_1$, el índice de refracción mínimo del núcleo 21 no es igual al índice de refracción del revestimiento externo n_{Cl} pero muestra una diferencia negativa del índice de refracción Dn_{1b} con respecto al revestimiento externo de fibra óptica.

[0067] En algunas otras realizaciones, $R_1 = R_{1b}$, y el índice de refracción mínimo del núcleo 21 es igual al índice de refracción del revestimiento externo n_{Cl} .

[0068] El núcleo óptico 21 está rodeado directamente por un revestimiento óptico, que comprende una región intermedia de índice deprimido 22, también llamada zanja intermedia, con radio interior R_{1b} y radio exterior R_2 , un anillo de índice deprimido 23, también llamado zanja, con radio interior R_2 y radio exterior R_3 , y una capa de revestimiento exterior 24 con radio interior R_3 . En algunas realizaciones, dicha capa de revestimiento exterior 24 consta de vidrio de sílice puro (SiO_2) y su índice de refracción n_{Cl} es, por lo tanto, el de vidrio de sílice.

[0069] La zanja intermedia 22 tiene una diferencia de índice de refracción negativa Dn_2 con respecto al índice de refracción del revestimiento exterior, y la zanja 23 tiene una diferencia de índice de refracción negativa $Dn_3 = n_{trench} - n_{Cl}$ comprendida entre -15×10^{-3} y -6×10^{-3} , de modo que $Dn_3 < Dn_2 < 0$. Su posición y tamaño están diseñados para mejorar la resistencia a pérdidas por curvatura de la fibra. En particular, su diseño es tal que:

- para $|Dn_{1b} - Dn_2| \geq 0,5 \times 10^{-3}$, $Min(Dn_{1b}, Dn_2) \leq -1,5 \times 10^{-3}$, y
- para $|Dn_{1b} - Dn_2| < 0,5 \times 10^{-3}$, Dn_2 está comprendido entre -5×10^{-3} y $-3,5 \times 10^{-3}$.

[0070] El diseño cuidadoso de una trinchera intermedia 22 de este tipo, asociada a la trinchera 23, permite formar una interfaz específica optimizada entre el núcleo óptico central y el revestimiento, y por lo tanto permite lograr fibras de pocos modos, que admiten 25 o 30 modos guiados LP.

[0071] La frecuencia normalizada
$$V = \frac{2\pi R_1}{\lambda_c} \sqrt{n_0^2 - n_{Cl}^2}$$

(donde λ_c es la longitud de onda de funcionamiento de la fibra) se encuentra entre 18,4 y 23.

[0072] $Max|DMGD|$ (es decir, el valor absoluto máximo del retardo de grupo de modo diferencial entre dos modos guiados en dicha fibra óptica) entre cualquier combinación de modos guiados LP es inferior a 200 ps/km, para λ , aquí 1550 nm (y más generalmente para $\lambda = \lambda_c$, donde λ_c es la longitud de onda central de cualquier banda de funcionamiento para la cual está destinada la fibra óptica). $Max|DMGD|$ también es preferiblemente < 500 ps/km de 1530 a 1570 nm (y más generalmente para cualquier banda de longitud de onda operativa $[\lambda_c - \delta\lambda; \lambda_c + \delta\lambda]$ donde 2δ es un ancho de dicha banda de funcionamiento, preferiblemente $2\delta = 20$ nm, como la banda C o la banda L, S o U, por ejemplo).

[0073] Todos los modos LP guiados de las FMF de acuerdo con una realización de la presente revelación tienen pérdidas por curvatura < 100 dB/vuelta, preferiblemente < 50 dB/vuelta, para un radio de curvatura de 10 mm a 1550 nm (y más generalmente a $\lambda = \lambda_c$, donde λ_c es la longitud de onda central de cualquier banda de funcionamiento para la cual está destinada la fibra óptica). Además, el área efectiva A_{eff} del modo LP_{01} fundamental, que es el área efectiva más pequeña de todos los modos guiados LP, es $> 150 \mu m^2$ a 1550 nm (y más generalmente a $\lambda = \lambda_c$, donde λ_c es la longitud de onda central de cualquier operación banda para la cual está destinada la fibra óptica). Como se usa en este documento, el área efectiva de una fibra óptica es el área de la fibra óptica en la que se propaga la luz y se determina en el modo especificado (por ejemplo, LP_{01}), a una longitud de onda de 1550 nm, a menos que se especifique lo contrario.

[0074] La tabla 1 proporciona los parámetros de los perfiles de índice de doce ejemplos de FMF de acuerdo con la realización de las figuras 2 y 3 (Ej. 1 a Ej. 12), y resultados en la frecuencia normalizada V, $Max|DMGD|$, $Max|BL|$, y área efectiva A_{eff} .

TABLA 1

	Comp Ej.	Ej.1	Ej.2	Ej. 3	Ej. 4	Ej. 5	Ej. 6	Ej. 7	Ej. 8	Ej. 9	Ej. 10	Ej. 11	Ej. 12
Número de modos LP guiados	30	25				30		25	30		25	30	
Alfa	1,940	1,94	1,94	1,94	1,94	1,93	1,93	1,94	1,93	1,94	1,91	1,92	1,92
$R_1(\mu m)$	25,00	23,1	22,9	22,5	25,0	21,6	21,6	22,2	22,5	22,5	22,8	25,0	25
$Dn_1 (x10^3 \text{ a } 1550 \text{ nm})$	15,8	15,8	15,8	15,8	12,8	18,7	19,8	14,5	17,1	17,1	13,6	16,0	15,8
$R_{1b}(\mu m)$	= R_1	25,0	25,0	25,0	26,9	22,2	22,7	25,0	25,0	25,0	= R_1	= R_1	= R_1
$Dn_{1b} (x10^3 \text{ a } 1550 \text{ nm})$	/	-2,6	-3,0	-3,6	-1,9	-1,0	-1,9	-3,9	-3,9	-3,9	0,0	0,0	0,0
$R_2(\mu m)$	26,16	25,8	26,1	26,1	29,5	25,7	25,7	28,5	25,7	26	28,8	31,0	31,0
$Dn_2 (x10^3 \text{ a } 1550 \text{ nm})$	0,00	-1,2	-1,0	-1,9	-2,9	-2,9	-3,9	= Dn_{1b}	= Dn_{1b}	= Dn_{1b}	-1,9	-1,9	-1,9
$R_3(\mu m)$	30,56	32,5	32,9	33,1	38,3	33,4	33,4	33,6	33,4	33,7	37,4	40,3	40,3
$Dn_3 (x10^3 \text{ a } 1550 \text{ nm})$	-6,60	-6,6	-9,6	-9,6	-6,7	-6,7	-6,7	-6,7	-6,7	-7,7	-6,7	-6,7	-8,7
V		20,1	19,9	19,5	19,6	20,4	21,0	18,4	20,4	20,4	18,4	21,8	21,7
$Max DMGD $	> 500	53	52	55	61	133	142	60	89	87	195	190	195
$Max BL A_{eff}$	> 1000	72	6	4	9	14	7	10	20	9	1	30	29
$A_{eff} (LP_{01} (\mu m^2))$	175	162	161	158	196	139	135	163	152	152	171	172	172

- 5 **[0075]** Como se puede observar, se dan doce ejemplos de FMF de acuerdo con las realizaciones de la presente descripción, y se comparan, en la primera columna de la tabla 1, con un ejemplo comparativo Comp. Ej., Correspondiente a una fibra de modos múltiples, que se habría adaptado para usarse a $\lambda = 1550$ nm, en lugar de $\lambda = 850$ nm, como suele ser el caso de las fibras de modos múltiples estándar. Dicha adaptación se realiza modificando el valor de α para el perfil de índice de gradiente del núcleo, que es de alrededor de 1,94, en lugar de $\alpha = 2,0$, como suele ser el caso de las MMF estándar.
- 10 **[0076]** Para tal ejemplo comparativo, el radio del núcleo es clásicamente $R_1 = 25$ μm , y el perfil de índice de gradiente del núcleo es tal que el índice de refracción mínimo del núcleo es igual al índice de refracción del revestimiento exterior. En otras palabras, $R_1 = R_{1b}$. Además, no existe zanja intermedia 22, y $Dn_2 = 0$. En otras palabras, no existe un diseño específico de la interfaz entre el núcleo óptico y el revestimiento, lo que da como resultado valores muy altos tanto de los máximos de retardos de grupo de modo diferenciales como pérdidas por curvatura máximas, tales como $\text{Max}|DMGD| > 500$ ps/km y $\text{Máx}|BL| > 1000$ dB / vuelta.
- 15 **[0077]** Dicha fibra (Comp. Ex), por lo tanto, no puede usarse como fibra de pocos modos para multiplexado por división de modo.
- [0078]** Los ejemplos Ej.1 a Ej. 4, Ej. 7 y Ej. 10 corresponden a FMF que admiten 25 modos guiados LP, mientras que los ejemplos Ej. 5, Ej. 6, Ej. 8, Ej. 9, Ej. 11 y Ej. 12 corresponden a FMF que admiten 30 modos guiados LP.
- 20 **[0079]** Los ejemplos Ej. 10 a Ej. 12 corresponden a una realización peculiar donde $R_1 = R_{1b}$, y el índice de refracción mínimo del núcleo óptico 21 es igual al índice de refracción n_{Cl} del revestimiento exterior 24.
- [0080]** Los ejemplos Ej. 7 a Ej. 9 corresponden a otra realización peculiar, donde $Dn_2 = Dn_{1b}$, es decir, el índice de refracción de la zanja intermedia 22 es igual al índice de refracción mínimo del núcleo 21.
- [0081]** Además, los ejemplos Ej. 1 a Ej. 6 y ej. 10 a ej. 12 corresponden a un diseño específico de la interfaz entre el núcleo y el revestimiento, que es tal que $|Dn_{1b} - Dn_2| \geq 0,5 \times 10^{-3}$, y $\text{Min}(Dn_{1b}, Dn_2) \leq -1,5 \times 10^{-3}$.
- 25 **[0082]** Los ejemplos Ej. 7 a Ej. 9 corresponden a otro diseño específico de la interfaz entre el núcleo y el revestimiento, que es tal que $|Dn_{1b} - Dn_2| < 0,5 \times 10^{-3}$ y Dn_2 está entre -5×10^{-3} y $-3,5 \times 10^{-3}$.
- [0083]** La figura 4 proporciona gráficamente el perfil del índice de refracción de dos fibras ópticas FMF ejemplares, correspondientes a los ejemplos Ej. 1 y Ej. 6 en la tabla 1. La diferencia del índice de refracción Dn que se muestra en el eje y se mide a 1550 nm, y el radio de la fibra FMF que se muestra en el eje x se expresa en μm .
- 30 **[0084]** La diferencia del índice de refracción de la FMF del ejemplo Ej. 6 se muestra en líneas discontinuas. El núcleo de índice de gradiente 21 muestra un perfil con $\alpha = 1,93$, un radio $R_1 = 21,6$ μm con diferencia de índice de refracción nula y una diferencia máxima de índice de refracción $Dn_1 = 19,8 \times 10^{-3}$ a 1550 nm. El perfil en α termina en $R_{1b} = 22,7$ μm , con una diferencia de índice $Dn_{1b} = -1,9 \times 10^{-3}$.
- 35 **[0085]** Una zanja intermedia 22 se dopa descendentemente en comparación con el núcleo óptico 21 y muestra una diferencia de índice de refracción con el revestimiento exterior 24 $Dn_2 = -3,9 \times 10^{-3}$. Termina en el radio $R_2 = 25,7$ μm . Está rodeada por una zanja 23, que está dopada descendentemente abajo en comparación con la zanja intermedia 22, y muestra una diferencia de índice de refracción con el revestimiento exterior 24 $Dn_3 = -6,7 \times 10^{-3}$ a 1550 nm. Termina en radio $R_3 = 33,4$ μm .
- 40 **[0086]** Para este ejemplo, como se indica en la tabla 1, tenemos $V = 21,0$, $\text{Max}|DMGD| = 142$ ps/km, $\text{Max}|BL| = 7$ dB/vuelta y $A_{\text{eff}} = 135 \mu\text{m}^2$ para el modo guiado LP₀₁.
- [0087]** La diferencia del índice de refracción de la FMF del ejemplo Ej. 1 se muestra en líneas continuas. El núcleo de índice de gradiente 21 muestra un perfil α con $\alpha = 1,94$, un radio $R_1 = 23,1$ μm con diferencia de índice de refracción 0 y una diferencia máxima de índice de refracción $Dn_1 = 15,8 \times 10^{-3}$ a 1550 nm. El perfil en α termina en $R_{1b} = 25,0$ μm , con diferencia de índice $Dn_{1b} = -2,6 \times 10^{-3}$.
- 45 **[0088]** Una zanja intermedia 22 se dopa ascendentemente en comparación con el índice de refracción mínimo del núcleo óptico 21 y muestra una diferencia de índice de refracción con el revestimiento exterior 24 $Dn_2 = -1,2 \times 10^{-3}$. Termina en el radio $R_2 = 25,8$ μm . Está rodeado por una zanja 23, que está dopada descendentemente en comparación con la zanja intermedia 22, y muestra una diferencia de índice de refracción con el revestimiento exterior 24 $Dn_3 = -6,6 \times 10^{-3}$ a 1550 nm. Termina en el radio $R_3 = 32,5$ μm .
- 50 **[0089]** Para este ejemplo, como se indica en la tabla 1, tenemos $V = 20,1$, $\text{Max}|DMGD| = 53$ ps/km, $\text{Max}|BL| = 72$ dB/vuelta y $A_{\text{eff}} = 162 \mu\text{m}^2$ para el modo guiado LP₀₁.
- [0090]** La figura 5 proporciona gráficamente el perfil de índice de refracción de otras dos fibras ópticas FMF ejemplares, correspondientes a los ejemplos Ej. 8 y Ej. 10 de la tabla 1. La diferencia del índice de refracción Dn que se muestra en el eje y se mide a 1550 nm, y el radio de la fibra FMF que se muestra en el eje x se expresa en μm .
- 55 **[0091]** La diferencia del índice de refracción de la FMF del ejemplo Ej. 8 se muestra en líneas grises. El núcleo de índice de gradiente 21 muestra un perfil con $\alpha = 1,93$, un radio $R_1 = 22,5$ μm con diferencia de índice de refracción 0 y una diferencia máxima de índice de refracción $Dn_1 = 17,1 \times 10^{-3}$ a 1550 nm. El perfil en α termina en $R_{1b} = 25,0$ μm , con diferencia de índice $Dn_{1b} = -3,9 \times 10^{-3}$.
- 60 **[0092]** Una zanja intermedia 22 tiene un índice de refracción, que es igual al índice de refracción mínimo del núcleo óptico 21, y por lo tanto muestra una diferencia de índice de refracción con el revestimiento exterior 24 $Dn_2 = Dn_{1b} = -39 \times 10^{-3}$. Termina en el radio $R_2 = 25,7$ μm . Está rodeada por una zanja 23, que está dopada descendentemente en comparación con la zanja intermedia 22, y muestra una diferencia de índice de refracción con el revestimiento exterior 24 $Dn_3 = -6,7 \times 10^{-3}$ a 1550 nm. Termina en radio $R_3 = 33,4$ μm .
- 65 **[0093]** Para este ejemplo, como se indica en la tabla 1, tenemos $V = 20,4$, $\text{Max}|DMGD| = 89$ ps/km, $\text{Max}|BL| = 20$ dB/vuelta y $A_{\text{eff}} = 152 \mu\text{m}^2$ para el modo guiado LP₀₁.

[0094] La diferencia del índice de refracción de la FMF del ejemplo Ej. 10 se muestra en líneas continuas negras. El núcleo de índice de gradiente 21 muestra un perfil con $\alpha = 1,91$, un radio $R_1 = 22,8 \mu\text{m}$ con diferencia de índice de refracción 0 y una diferencia máxima de índice de refracción $Dn_1 = 13,6 \times 10^{-3}$ a 1550 nm. El perfil en α termina en $R_1 = R_{1b}$, con una diferencia de índice de refracción cero con respecto al revestimiento exterior.

[0095] Una zanja intermedia 22 se dopa descendentemente en comparación con el revestimiento exterior 24 y muestra una diferencia de índice de refracción con el revestimiento exterior 24 $Dn_2 = -1,9 \times 10^{-3}$. Termina en el radio $R_2 = 28,8 \mu\text{m}$. Está rodeado por una zanja 23, que está dopada descendentemente en comparación con la zanja intermedia 22, y muestra una diferencia de índice de refracción con el revestimiento exterior 24 $Dn_3 = -6,7 \times 10^{-3}$ a 1550 nm. Termina en el radio $R_3 = 37,4 \mu\text{m}$.

[0096] Para este ejemplo, como se indica en la tabla 1, tenemos $V = 18,4$, $\text{Max}|DMGD| = 195 \text{ ps/km}$, $\text{Max}|BL| = 1 \text{ dB/vuelta}$ y $A_{\text{eff}} = 171 \mu\text{m}^2$ para el modo guiado LP_{01} .

[0097] La figura 6 ilustra un enlace óptico 60 de acuerdo con una realización de la presente descripción. Tal enlace óptico comprende p tramos de fibras ópticas, con $p \geq 2$, que se unen. La figura 6 solo muestra la fibra óptica 60_1 y la fibra óptica 60_p , todas las demás fibras ópticas potenciales en el enlace óptico están simbolizadas por líneas discontinuas. Al menos una de las fibras ópticas en el enlace óptico 60 es tal que comprende las características de una realización descrita anteriormente. En otras palabras, al menos una de las fibras ópticas admite 25 o 30 modos guiados LP y muestra el diseño específico de la interfaz entre el núcleo y el revestimiento descrito anteriormente en relación con las figuras 2 a 5, y en particular:

- Un núcleo de índice de gradiente con un perfil en α con α entre 1 y 3, un radio R_1 (a una diferencia de índice de refracción 0) entre $21,5$ y $27 \mu\text{m}$ y una diferencia de índice de refracción máxima Dn_1 entre $12,5 \times 10^{-3}$ y 20×10^{-3} , y un final del perfil en α en un radio R_{1b} , con diferencia de índice Dn_{1b} ;

- Una zanja que rodea el núcleo con radio R_3 entre 30 y $42 \mu\text{m}$ y diferencia de índice de refracción Dn_3 entre $-15 \cdot 10^{-3}$ y $-6 \cdot 10^{-3}$,

- Una zanja deprimida intermedia con un radio R_2 , con $R_{1b} < R_2 < R_3$ y una diferencia de índice de refracción Dn_2 , con $Dn_3 < Dn_2 < 0$, y un diseño específico de las diferencias de índice de refracción de estas diferentes partes de la FMF de manera que:

- para $|Dn_{1b} - Dn_{21}| \geq 0,5 \times 10^{-3}$, $\text{Min}(Dn_{1b}, Dn_2) \leq -1,5 \times 10^{-3}$ y para:

- $|Dn_{1b} - Dn_2| < 0,5 \times 10^{-3}$, Dn_2 está entre -5×10^{-3} y $-3,5 \times 10^{-3}$.

[0098] Sin embargo, el enlace óptico 60 también puede ser tal que varias o todas las fibras ópticas que comprende cumplen con una realización de la presente descripción.

[0099] En una realización específica, el enlace óptico 60 está compuesto por varios tramos de FMF, que muestran DMGD con signos opuestos, y que se combinan en un mismo enlace óptico. Por ejemplo, los tramos de FMF utilizados corresponden a FMF que cumplen todos los criterios y el rendimiento descritos anteriormente para FMF de acuerdo con las realizaciones de la presente divulgación, pero cuyos criterios reales difieren entre sí, ya sea a propósito o debido a variaciones del proceso durante la fabricación. Por ejemplo, considerando cualquier par de fibras que forman el enlace óptico, las diferencias de índice de refracción a 1550 nm logradas para Dn_1 , Dn_2 y Dn_3 pueden diferir en no más de $\pm 5 \times 10^{-3}$, los radios R_1 , R_{1b} , R_2 y R_3 no pueden diferir en más de $\pm 5 \mu\text{m}$, y el valor α puede diferir en no más de $\pm 0,02$ entre cualquier combinación de fibras que formen el enlace óptico. En otras palabras, el propósito de dicho enlace óptico es, entre otros, compensar las pequeñas variaciones de perfil que pueden ocurrir durante el proceso de fabricación de una fibra de modo reducido mediante la concatenación de varias FMF que muestran diferentes características.

[0100] En realidad, hay valores para α , para los cuales $\text{Max}|DMGD|$ tienen valores mínimos, y α menor y mayor que estos "α óptimos" generalmente que presentan DMGD con signos opuestos.

[0101] Como consecuencia, los inventores han llegado a la conclusión de que, si un FMF está fuera del objetivo en términos de α (es decir, si el valor α de la FMF es ligeramente superior o inferior al "α óptimo", por ejemplo, en el orden de $\pm 0,02$), es posible asociarlo con otra FMF que muestre un α apropiado (es decir, ya sea mayor que el "α óptimo" cuando el α fuera de objetivo es menor, o menor que el "α óptimo" si el α fuera de objetivo es mayor), eligiendo las longitudes apropiadas para ambos FMF, a fin de realizar un enlace "compensado en DMGD".

[0102] Esta asociación puede, por ejemplo, compensar la variabilidad del proceso que puede dar como resultado FMF con alfa ligeramente no óptimos.

[0103] El enlace de fibra óptica 60 tiene una longitud de L km, que puede ser de varias decenas o varios cientos de kilómetros. En un ejemplo, existen al menos dos tramos de fibra 60_1 y 60_2 . En otro ejemplo, existen al menos cinco tramos de fibras 60_1 a 60_5 . En otro ejemplo, existen al menos diez tramos de fibra 60_1 a 60_{10} .

[0104] En otras palabras, las fibras de pocos modos 1 a p se unen para formar un enlace óptico 60 de longitud $L = L_1 + \dots + L_i + \dots + L_p$, que puede ser de varias decenas o varios cientos de kilómetros.

[0105] Las longitudes L_i de los diferentes tramos de fibras se eligen para minimizar la DMGD máxima del enlace óptico, y para que el enlace óptico muestre parámetros de enlace que cumplan los requisitos establecidos anteriormente para las fibras FMF en relación con las realizaciones de la presente divulgación, especialmente:

- un radio de núcleo óptico promedio R_{1link} para dicho enlace óptico comprendido entre $21,5 \mu\text{m}$ y $27 \mu\text{m}$

donde $R_{1link} = \frac{\sum_{i=1}^N R_{1i} L_i}{\sum_{i=1}^N L_i}$ siendo L_i una longitud de la fibra óptica i de dicho enlace,

- una diferencia de índice de refracción máxima media Dn_{1link} para dicho enlace óptico comprendida entre $12,5 \times 10^{-3}$

5 y 20×10^{-3} , donde
$$Dn_{1link} = \frac{\sum_{i=1}^N Dn_{1i} L_i}{\sum_{i=1}^N L_i},$$
 para $\lambda = 1550$,

- un radio exterior de zanja promedio R_{3link} entre $30 \mu\text{m}$ y $42 \mu\text{m}$ donde
$$R_{3link} = \frac{\sum_{i=1}^N R_{3i} L_i}{\sum_{i=1}^N L_i},$$

- una diferencia de índice de refracción promedio entre la zanja y el revestimiento Dn_{3link} comprendida entre

- 15×10^{-3} y -6×10^{-3} para $\lambda = 1550 \text{ nm}$, donde
$$Dn_{3link} = \frac{\sum_{i=1}^N Dn_{3i} L_i}{\sum_{i=1}^N L_i},$$

10 - para $|Dn_{1blink} - Dn_{2link}| \geq 0,5 \times 10^{-3}$, $\text{Min}(Dn_{1blink}, Dn_{2link}) \leq -1,5 \times 10^{-3}$, y

- para $|Dn_{1blink} - Dn_{2link}| < 0,5 \times 10^{-3}$, Dn_{2link} entre -5×10^{-3} y $-3,5 \times 10^{-3}$ donde
$$Dn_{2link} = \frac{\sum_{i=1}^N Dn_{2i} L_i}{\sum_{i=1}^N L_i}$$
 es la diferencia de

índice de refracción promedio entre la zanja intermedia y el revestimiento para dicho enlace óptico

15 y donde
$$Dn_{1blink} = \frac{\sum_{i=1}^N Dn_{1bi} L_i}{\sum_{i=1}^N L_i}$$
 es la diferencia de índice de refracción promedio entre el núcleo en su radio

exterior y el revestimiento para dicho enlace óptico, ambas para $\lambda = 1550 \text{ nm}$.

20 **[0106]** Estos enlaces compensados en DMGD, que soportan 25 o 30 modos guiados LP, tienen $\text{Max}|\text{DMGD}| < 100$ ps/km a $\lambda = 1550 \text{ nm}$ (y más generalmente a $\lambda = \lambda_C$, donde λ_C es la longitud de onda central de cualquier banda de funcionamiento para la cual está destinada la fibra óptica) y < 300 ps/km de 1530 a 1570 nm (y más generalmente para cualquier banda de funcionamiento de longitud de onda $[\lambda_C - \delta\lambda; \lambda_C + \delta\lambda]$ donde $2\delta\lambda$ es un ancho de dicha banda de funcionamiento, preferiblemente $2\delta\lambda = 20 \text{ nm}$, tal como la banda C, o la banda L, S o U, por ejemplo).

[0107] Las figuras 7A y 7B ilustran realizaciones de un sistema óptico de acuerdo con la presente descripción.

25 **[0108]** Según la primera realización en la figura 7A, dicho sistema óptico comprende transceptores 71 y receptores 75 conectados ópticamente por un enlace de fibra óptica 60 que incluye al menos un tramo de fibra. Los transceptores 71 comprenden fuentes de luz (como láser) y generan n modos LP, referenciados 1, 2, ..., n, utilizados en el sistema óptico de la figura 7A. Un multiplexor de modo 72, multiplexa los n modos LP y está conectado ópticamente al enlace óptico 60, que guía los n modos LP multiplexados, hacia un demultiplexor de modo 73, que está conectado ópticamente al final del enlace óptico 60.

30 **[0109]** El demultiplexor de modo 73 demultiplexa los n modos LP multiplexados y alimenta cada modo LP a un amplificador 74. En la salida de los amplificadores 74, los modos LP entran en los receptores 75.

[0110] Tal sistema óptico puede comprender M enlaces ópticos (o M tramos de fibras ópticas). En un ejemplo, $M = 1$; en otro ejemplo, $M = 2$; en otro ejemplo $M = 5$; En otro ejemplo, $M = 10$. En caso de que el sistema óptico comprenda M enlaces o tramos ópticos, también comprende multiplexores de modo M 72, demultiplexores de modo M 73 y amplificadores M 74 para cada modo LP guiado por el sistema óptico.

35 **[0111]** La realización en la figura 7B difiere de la primera realización en la figura 7A en que el amplificador 74 amplifica todos los modos LP guiados por la fibra óptica 60; como tal, el amplificador 74 está conectado ópticamente entre la salida del enlace óptico 60 y la entrada del demultiplexor de modo 73. En esta segunda realización, cuando el sistema óptico comprende M enlaces o tramos ópticos, también comprende M amplificadores 74; sin embargo, solo hay un multiplexor de modo 72, conectado ópticamente entre los transceptores 71 y un enlace óptico 60, y solo un demultiplexor de modo 73, conectado ópticamente entre el amplificador 74 y los receptores 75.

40 **[0112]** Las realizaciones de las figuras 7A y 7B se dan como simples ejemplos, y una fibra óptica de acuerdo con la presente revelación puede, por supuesto, usarse en cualquier otro tipo de sistema óptico.

REIVINDICACIONES

1. Fibra óptica que comprende un núcleo óptico central rodeado por un revestimiento óptico, teniendo dicho núcleo óptico un perfil de índice gradual en $n(r)$ con α entre 1 y 3, siendo α un parámetro adimensional que define una forma de perfil de índice de dicho núcleo óptico, que es función de una distancia radial r desde el centro de dicho núcleo óptico,
- 5 teniendo dicho núcleo óptico un índice de refracción máximo n_0 y un radio exterior R_{1b} con una diferencia de índice de refracción $Dn_{1b} = n(R_{1b}) - n_{Cl}$ con respecto a dicho revestimiento óptico que tiene en su borde exterior un índice de refracción n_{Cl} ,
- 10 teniendo dicho núcleo óptico un radio R_1 , en el que $n(R_1) = n_{Cl}$, comprendido entre $21,5 \mu\text{m}$ y $27 \mu\text{m}$ y una diferencia de índice de refracción máxima $Dn_1 = n_0 - n_{Cl}$, comprendida entre $12,5 \times 10^{-3}$ y 20×10^{-3} , siendo determinada dicha diferencia de índice de refracción a $\lambda = \lambda_C$, donde λ_C es una longitud de onda de transmisión central de una banda de funcionamiento a la cual está destinada dicha fibra óptica, comprendiendo dicho revestimiento óptico:
- 15 - una región de índice de refracción deprimido n_{trench} , llamada zanja, que rodea el núcleo óptico, teniendo dicha zanja un radio exterior R_3 , comprendido entre $30 \mu\text{m}$ y $42 \mu\text{m}$, y una diferencia de índice de refracción $Dn_3 = n_{trench} - n_{Cl}$ entre la zanja y el revestimiento comprendida entre -15×10^{-3} y -6×10^{-3} ;
- una región intermedia de índice de refracción deprimido, llamada zanja intermedia, que rodea el núcleo óptico, teniendo dicha zanja intermedia un radio exterior R_2 , con $R_{1b} < R_2 < R_3$, y una diferencia de índice de refracción Dn_2 entre la zanja intermedia y el revestimiento, con $Dn_3 < Dn_2 < 0$,
- 20 donde:
- para $|Dn_{1b} - Dn_2| \geq 0,5 \times 10^{-3}$, $Min(Dn_{1b}, Dn_2) \leq -1,5 \times 10^{-3}$, y
- para $|Dn_{1b} - Dn_2| < 0,5 \times 10^{-3}$, estando comprendida Dn_2 entre -5×10^{-3} y $-3,5 \times 10^{-3}$.
- $$V = \frac{2\pi R_1}{\lambda_C} \sqrt{n_0^2 - n_{Cl}^2}$$
2. Fibra óptica según la reivindicación 1, en la que su frecuencia normalizada está
- 25 comprendida entre 18,4 y 23.
3. Fibra óptica según la reivindicación 1 o 2, en la que se guían al menos 25 modos LP.
4. Fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en la que se guían al menos 30 modos LP.
- 30 5. Fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en la que $Max|DMGD_s| < 200 \text{ ps/km}$ para $\lambda = \lambda_C$, donde λ_C es una longitud de onda de transmisión central de una banda de funcionamiento a la cual se encuentra destinada dicha fibra óptica, donde $DMGD$ es el retardo de grupo de modo diferencial entre dos modos guiados en dicha fibra óptica, y donde $Max|DMGD_s|$ es el máximo en valor absoluto de $DMGD$ entre cualquier combinación de modos guiados.
- 35 6. Fibra óptica según la reivindicación 5, en la que $Max|DMGD_s| < 500 \text{ ps/km}$ para $\lambda \notin [\lambda_C - \delta\lambda; \lambda_C + \delta\lambda]$, donde λ_C es una longitud de onda central de transmisión de una banda de funcionamiento a la cual está destinada dicha fibra óptica y donde $2 \delta\lambda$ es el ancho de dicha banda de funcionamiento.
- 40 7. Fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en la que el modo LP01 fundamental guiado por dicha fibra óptica tiene un área efectiva $A_{\text{eff}} > 150 \mu\text{m}^2$ para $\lambda = \lambda_C$.
8. Fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que $Max|BL| < 100 \text{ dB/vuelta}$, preferiblemente $< 50 \text{ dB/vuelta}$, para un radio de curvatura de 10 mm para $\lambda = \lambda_C$, donde BL son las pérdidas por curvatura de los diferentes modos guiados en dicha fibra óptica, y donde $Max|BL|$ es el máximo en valor absoluto de BL para todos los modos guiados.
- 45 9. Fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en la que $\lambda_C = 1550 \text{ nm}$ y $\delta\lambda = 20 \text{ nm}$.
- 50 10. Enlace óptico que comprende al menos una fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9.
11. Enlace óptico que comprende N fibras ópticas con $N \geq 2$, siendo N un número entero comprendiendo cada fibra óptica de índice $i \in \llbracket 1; N \rrbracket$, un núcleo óptico central y un revestimiento rodeando el núcleo óptico, teniendo el núcleo óptico un perfil de índice gradual en $\alpha_i n_i(r)$ con α_i comprendido entre 1 y 3, siendo α_i un parámetro adimensional que define una forma de perfil de índice del núcleo óptico que función de la distancia radial r desde el centro de dicho núcleo óptico,
- 55 y teniendo el núcleo óptico un índice de refracción máximo n_{0i} , y un radio exterior R_{1bi} con una diferencia de índice de refracción $Dn_{1bi} = n_i(R_{1bi}) - n_{Cli}$ con respecto a dicho revestimiento óptico que tiene en su borde exterior

un índice de refracción n_{Cii} , teniendo también dicho núcleo óptico un radio R_{1i} , en el que $n_i(R_{1i}) = n_{Cii}$ una diferencia de índice de refracción máxima $Dn_{1i} = n_{0i} - n_{Cii}$ comprendiendo dicho revestimiento externo

5 - una región de índice de refracción deprimido $n_{trenchi}$, llamada zanja, que rodea el núcleo óptico, teniendo dicha zanja un radio exterior R_{3i} , y una diferencia de índice de refracción $Dn_{3i} = n_{trenchi} - n_{Cii}$ entre la zanja y el revestimiento;

- una región intermedia de índice de refracción deprimido, llamada zanja intermedia, que rodea el núcleo óptico, teniendo dicha zanja intermedia un radio exterior R_{2i} con $R_{1bi} < R_{2i} < R_{3i}$, y una diferencia de índice de refracción Dn_{2i} entre dicha franja intermedia y el revestimiento con $Dn_{3i} < Dn_{2i} < 0$,

10 en el que un radio de núcleo óptico medio R_{1link} para dicho enlace óptico está comprendido entre $21,5 \mu\text{m}$ y $27 \mu\text{m}$

donde $R_{1link} = \frac{\sum_{i=1}^N R_{1i}L_i}{\sum_{i=1}^N L_i}$ siendo L_i una longitud de la fibra óptica i de dicho enlace,

una diferencia de índice de refracción máxima media Dn_{1link} para dicho enlace óptico se encuentra entre $12,5 \times 10^{-3}$

15 y 20×10^{-3} , donde $Dn_{1link} = \frac{\sum_{i=1}^N Dn_{1i}L_i}{\sum_{i=1}^N L_i}$, para $\lambda = \lambda_c$, donde λ_c es una longitud de onda de transmisión central de una banda de funcionamiento para la que está destinada dicha fibra óptica,

estando comprendido un radio exterior de zanja promedio R_{3link} entre $30 \mu\text{m}$ y $42 \mu\text{m}$ donde

$R_{3link} = \frac{\sum_{i=1}^N R_{3i}L_i}{\sum_{i=1}^N L_i}$, siendo L_i una longitud de la fibra óptica i de dicho enlace,

20 una diferencia de índice de refracción promedio entre la zanja y el revestimiento Dn_{3link} para dicho enlace

óptico está comprendida entre -15×10^{-3} y -6×10^{-3} para $\lambda = \lambda_c$, donde $Dn_{3link} = \frac{\sum_{i=1}^N Dn_{3i}L_i}{\sum_{i=1}^N L_i}$,

y donde:

- para $|Dn_{1blink} - Dn_{2link}| \geq 0,5 \times 10^{-3}$, $Min(Dn_{1blink}, Dn_{2link}) \leq -1,5 \times 10^{-3}$, y

25 - para $|Dn_{1blink} - Dn_{2link}| < 0,5 \times 10^{-3}$, Dn_{2link} está comprendida entre -5×10^{-3} y $-3,5 \times 10^{-3}$ donde $Dn_{2link} = \frac{\sum_{i=1}^N Dn_{2i}L_i}{\sum_{i=1}^N L_i}$

es la diferencia de índice de refracción promedio entre la zanja intermedia y el revestimiento para dicho enlace óptico

y donde $Dn_{1blink} = \frac{\sum_{i=1}^N Dn_{1bi}L_i}{\sum_{i=1}^N L_i}$ es la diferencia de índice de refracción promedio entre el núcleo en su radio

30 exterior y el revestimiento para dicho enlace óptico, ambas para $\lambda = \lambda_c$, donde λ_c es una longitud de onda de transmisión central de una banda de funcionamiento a la que se destina el enlace óptico.

12. Enlace óptico según la reivindicación 11, en el que su frecuencia normalizada

$V_{link} = \frac{2\pi R_{1link}}{\lambda_c} \sqrt{n_{0link}^2 - n_{Clink}^2}$ se encuentra entre 18,4 y 23, donde $n_{0link} = \frac{\sum_{i=1}^N n_{0i}L_i}{\sum_{i=1}^N L_i}$ es el índice de

35 refracción máximo promedio del núcleo para dicho óptica enlace, y dónde $n_{Clink} = \frac{\sum_{i=1}^N n_{Cii}L_i}{\sum_{i=1}^N L_i}$

es el índice de refracción promedio del revestimiento para dicho enlace óptico.

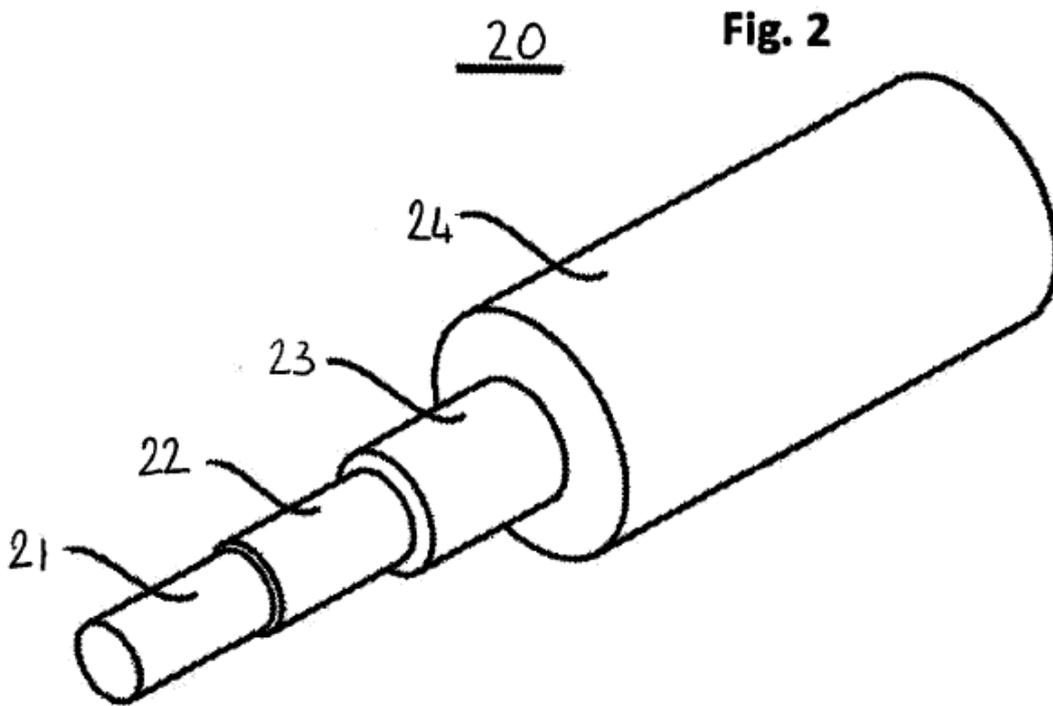
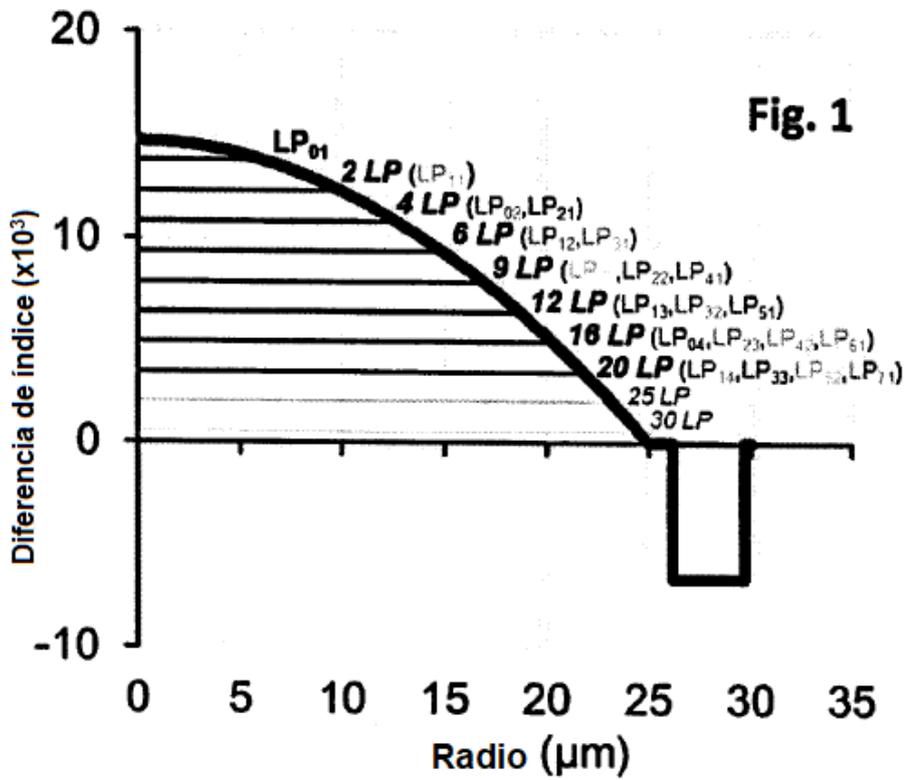
40 13. Enlace óptico según cualquiera de las reivindicaciones 11 y 12, en el que se guían al menos 25 modos LP.

14. Enlace óptico según cualquiera de las reivindicaciones 11 a 13, en el que se guían al menos 30 modos LP.

45 15. Enlace óptico según cualquiera de las reivindicaciones 11 a 14, en el que para todas las fibras ópticas $i \in \{1; N\}$, de dicho enlace, dichas longitudes L_i se eligen para minimizar $Max|DMGD_{link}|$ en dicho enlace, donde $DMGD_{link}$ es el diferencial de retardo de grupo de modo entre dos modos guiados en dicho enlace óptico, y donde $Max|DMGD_{link}|$ es el valor absoluto máximo del diferencial de retardo de grupo de modo entre cualquier combinación de modos guiados en dicho enlace óptico.

50 16. Enlace óptico según cualquiera de las reivindicaciones 11 a 15, en el que al menos dos fibras ópticas de dicho enlace tienen $DMGD_i$ mostrando signos opuestos para al menos un modo guiado por dichas fibras ópticas, donde $DMGD_i$ es el diferencial de retardo de grupo de modo entre dicho modo y cualquier otro modo guiado en fibra óptica i .

17. Enlace óptico según la reivindicación 15, en el que $Max|DMGD_{link}| < 200 \text{ ps/km}$ para $\lambda = \lambda_C$, donde λ_C es una longitud de onda de transmisión central de una banda de funcionamiento para la cual está destinada dicha fibra óptica.
- 5 18. Enlace óptico según la reivindicación 17, en el que $Max|DMGD_{link}| < 500 \text{ ps/km}$ para $\lambda \notin [\lambda_C - \delta\lambda; \lambda_C + \delta\lambda]$, donde λ_C es una longitud de onda de transmisión central de una banda de funcionamiento para la cual está destinada dicha fibra óptica y donde $2\delta\lambda$ es un ancho de dicha banda de funcionamiento.
- 10 19. Enlace óptico según cualquiera de las reivindicaciones 11 a 18, en el que $Max|BL_{link}| < 100 \text{ dB/vuelta}$, preferiblemente $< 50 \text{ dB/vuelta}$, con un radio de curvatura de 10 mm a $\lambda - \lambda_C$, donde BL_{link} son las pérdidas por curvatura de los diferentes modos guiados en dicho enlace óptico, y donde $Max|BL_{link}|$ es el máximo del valor absoluto de BL_{link} para todos los modos guiados en dicho enlace óptico.
- 15 20. Enlace óptico según cualquiera de las reivindicaciones 11 a 19, en el que $\lambda_C = 1550 \text{ nm}$ y $\delta\lambda = 20 \text{ nm}$.
- 20 21. Enlace óptico que comprende N fibras ópticas según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 20, con $N \geq 2$, siendo N un número entero, en donde cualquiera de las dos fibras ópticas elegidas entre las fibras ópticas que forman dicho enlace óptico tienen diferencias de índice de refracción Dn_1 y/o Dn_2 y/o Dn_3 a λ_C con valores que difieren en un máximo de $\pm 0,5 \times 10^{-3}$ y/o radios R_1 y/o R_{1b} y/o R_2 y/o R_3 con valores que difieren en un máximo de $\pm 0,5 \text{ }\mu\text{m}$, y en donde al menos dos de las fibras ópticas tienen $DMGD$ con signos opuestos, donde $DMGD$ es el diferencial de retardo de grupo de modo entre dos modos guiados en dicha fibra óptica.
- 25 22. Sistema óptico que comprende al menos una fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10 o al menos un enlace óptico según cualquiera de las reivindicaciones 11 a 21.



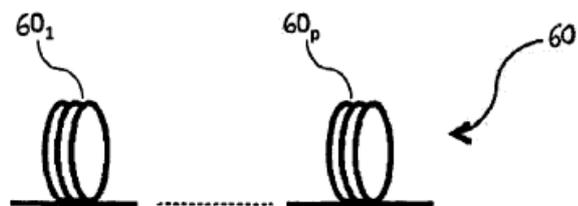
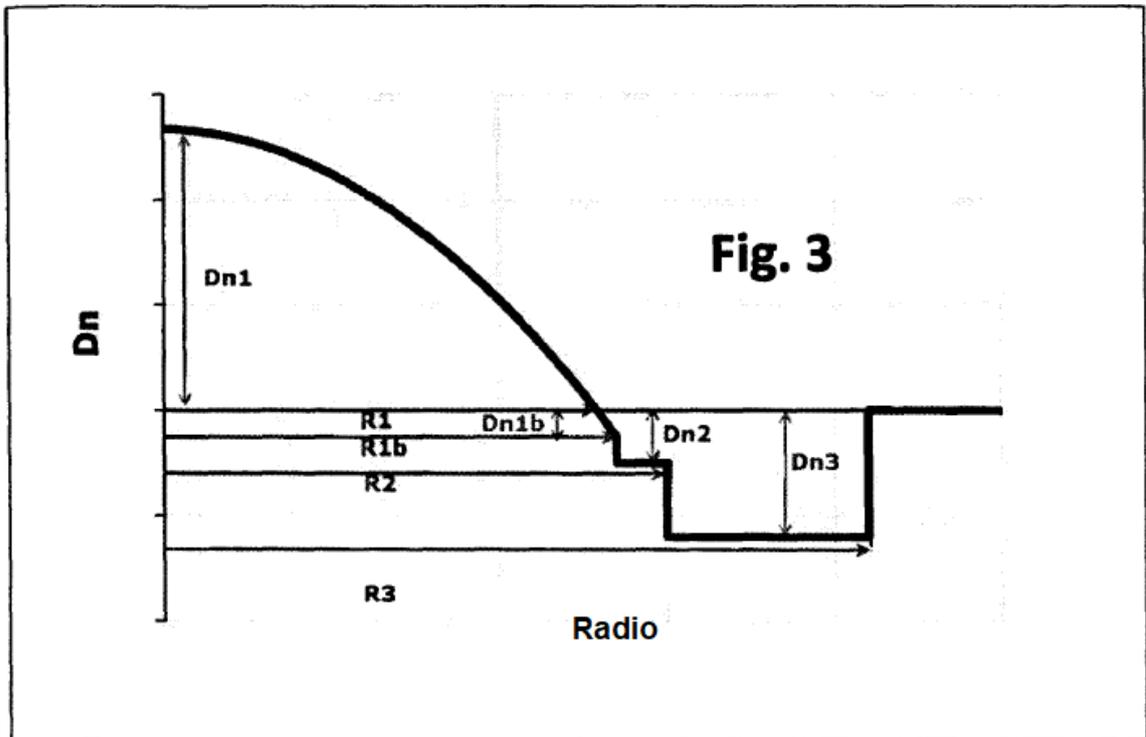


Figura 6

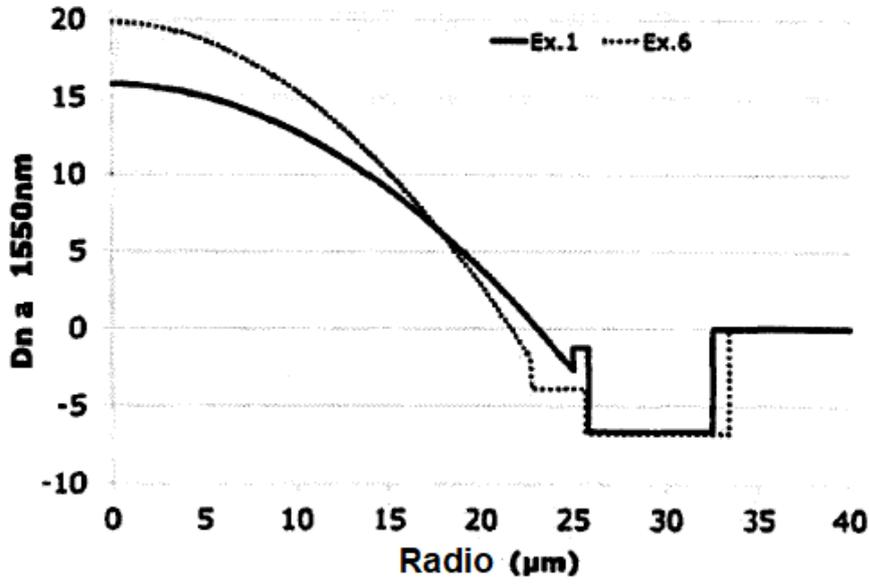


Fig. 4

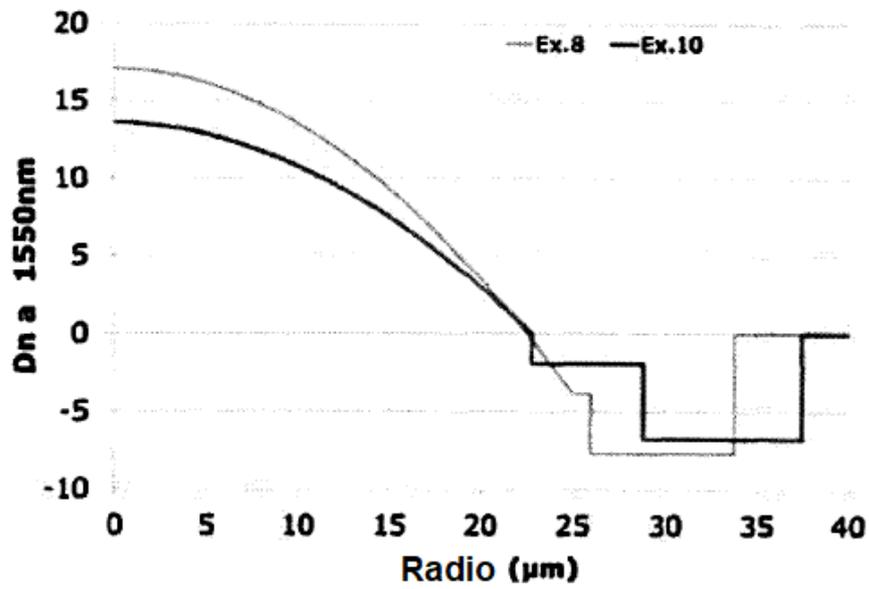


Fig. 5

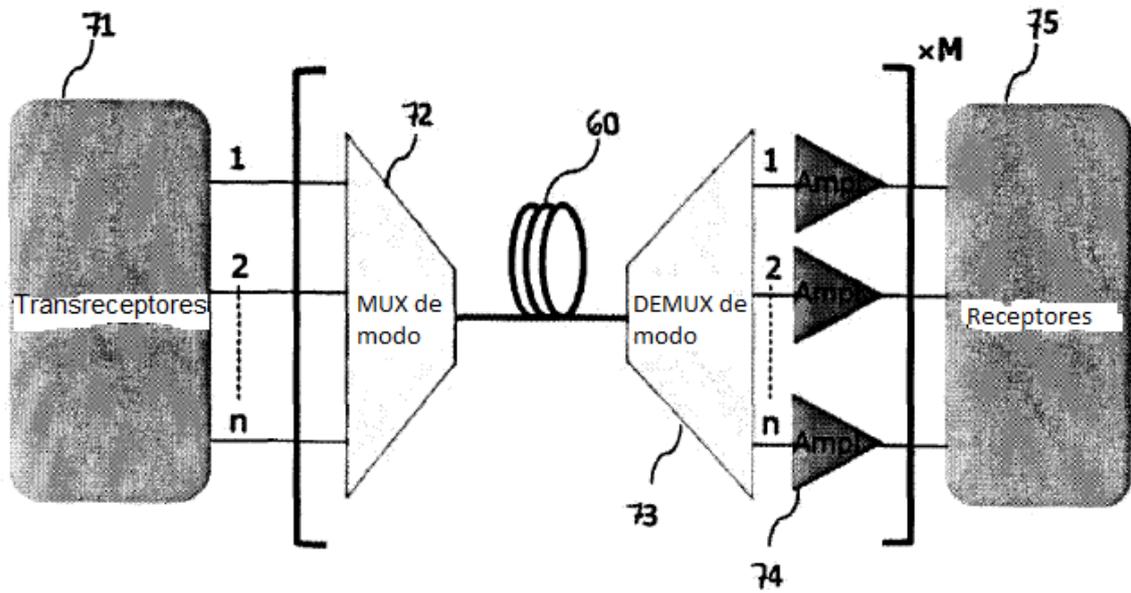


Fig. 7A

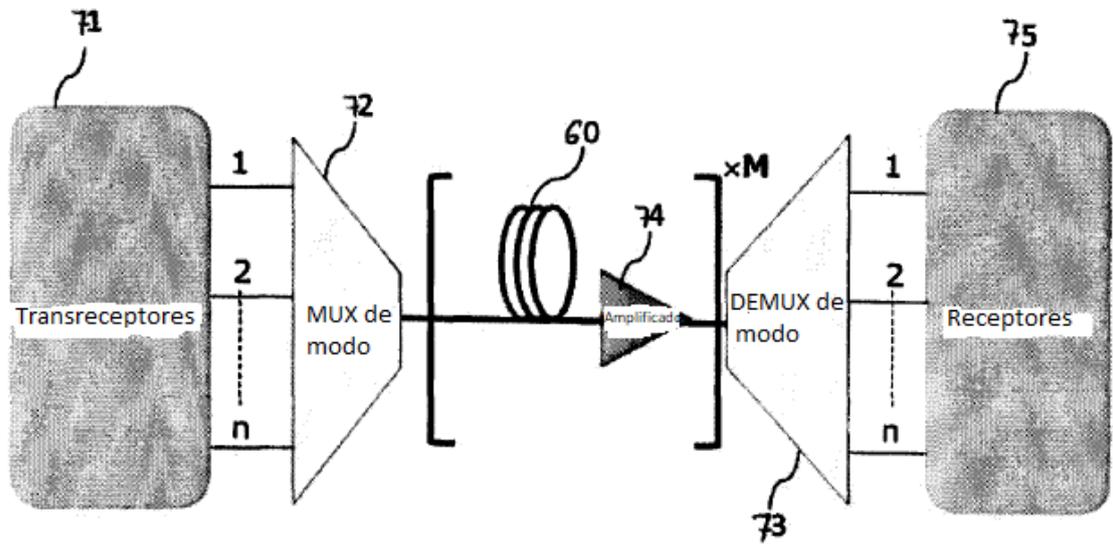


Fig. 7B

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

- WO 2011094400 PCT [0007]
- US 20150168643 A [0013]

10 **Bibliografía no de patentes citada en la descripción**

- **SILLARD**. 50mm Multimode Fibers for Mode Division Multiplexing. *proc. Ecoc*, 2015, vol. 4.2.1 [0011]