

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 665 751**

51 Int. Cl.:

G02B 6/028 (2006.01)

G02B 6/036 (2006.01)

H04B 10/25 (2013.01)

H04J 14/04 (2006.01)

G02B 6/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **20.09.2013 PCT/IB2013/002412**

87 Fecha y número de publicación internacional: **26.03.2015 WO15040446**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **20.09.2013 E 13830039 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.01.2018 EP 3047316**

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

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

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

SILLARD, PIERRE;
MOLIN, DENIS y
BIGOT-ASTRUC, MARIANNE

74 Agente/Representante:

ARPE FERNÁNDEZ, Manuel

ES 2 665 751 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 espacio

5

1. Campo de la invención

[0001] La invención se refiere al campo de la transmisión por fibra óptica, y, más específicamente a mejorar diseños de fibra multimodales.

10

2. Antecedentes

[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. Para ese fin, el índice de refracción del núcleo, n_c , 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 y el 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 .

15

[0003] Actualmente, existen dos categorías principales de fibras ópticas: fibras multimodo y fibras de modo único. En una fibra multimodo, 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 cortados o altamente atenuados.

20

[0004] Las fibras de modo único se usan comúnmente para aplicaciones de larga distancia, tales como redes de acceso o redes metropolitanas. 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 11 μm). Para cumplir los requisitos de aplicaciones de alta velocidad o velocidad binaria (por ejemplo 10 Gbps), las fibras estándar de modo único requieren el uso de un emisor láser de modo único modulado ajustado para trabajar típicamente a una longitud de onda de 1550 nm. Sin embargo, las fibras de modo único sufren problemas de no linealidad, que son limitaciones importantes en la capacidad de transmisión por fibra.

25

[0005] Las fibras multimodo se usan comúnmente para aplicaciones de corta distancia que requieren un gran ancho de banda, tales como redes de área local (LAN) y unidades de viviendas múltiples (MDU), más generalmente conocidas como redes en edificaciones. El núcleo de una fibra multimodo típicamente tiene un diámetro de 50 μm o 62,5 μm . Las fibras multimodo más frecuentes en las telecomunicaciones son las fibras ópticas de perfil de índice gradual. Minimizando 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 llamada DMGD por Diferencial Mode Group Delay [retardo de grupo de modo diferencial]), dicho perfil de índice de refracción garantiza un alto ancho de banda modal para una longitud de onda dada.

30

[0006] Como el tráfico de datos a través de las redes de fibra óptica continúa creciendo exponencialmente, hay una demanda creciente de aumento del tráfico por fibra, particularmente a través de largas distancias. Con este fin, se han desarrollado técnicas de multiplexado que permiten que una pluralidad de flujos de datos separados comparta la misma fibra óptica. Entre estas técnicas, un enfoque prometedor es el multiplexado por división de espacio (SDM), en la cual una pluralidad de canales de datos dentro de una sola fibra óptica se proporciona por una pluralidad respectiva de modos de señal óptica guiados por la fibra.

35

[0007] Una técnica de este tipo ha requerido el desarrollo de nuevos tipos de fibras ópticas, llamadas fibras ópticas multi modales, que soportan más de un modo espacial pero menos modos espaciales que las fibras multimodo. Tales fibras multimodales que se tratan en particular en el documento de patente PCT WO2011/094400, soportan aproximadamente de 2 a 50 modos. Se pueden configurar para no tener los problemas de dispersión modal que ocurren en las fibras de modos múltiples.

45

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

50

[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 multiplexado espacial), de manera que todos los modos se pueden detectar simultáneamente utilizando el complejo $2N \times 2N$ (N es el número total de modos espaciales, es decir, que incluye degeneraciones de PL (polarización lineal)) técnicas MIMO, independientemente del fenómeno de acoplamiento de modo que es uno de los factores limitantes para salvar largas distancias. Sin embargo, esta optimización se vuelve cada vez más difícil cuando aumenta el número de modos PL.

55

[0010] Sin embargo, se debe tener en cuenta que se pueden usar técnicas MIMO menos complejas agrupando modos PL que tienen diferencias de índice efectivas cercanas, y detección de grupos de modos PL, en lugar de modos PL individuales.

60

[0011] Una primera solución conocida se describe en el documento de patente US 2013/0071114, que describe una fibra óptica de pocos modos, adecuada para su uso en un sistema de transmisión óptica de multiplexado por división de modos. Tal fibra óptica tiene un único núcleo alfa de índice gradual con un radio R_1 (con valores de hasta 11,4 μm en las realizaciones descritas), un valor alfa mayor que o igual a aproximadamente 2,3 y menor que aproximadamente 2,7 a una longitud de onda de 1550 nm, y un máximo relativo índice de refracción $\Delta_{1\text{MAX}}$ de

65

aproximadamente 0,3% a aproximadamente 0,6% en relación con el revestimiento. La fibra óptica también tiene un efecto área mayor que aproximadamente $90 \mu\text{m}^2$ y menor que aproximadamente $160 \mu\text{m}^2$. El revestimiento tiene un índice de refracción relativo máximo $\Delta_{4\text{MAX}}$ tal que $\Delta_{1\text{MAX}} > \Delta_{4\text{MAX}}$, y el retardo de grupo de modo diferencial entre los modos PL01 y PL11 es menor que aproximadamente 0,5 ns/km a una longitud de onda de 1550 nm.

5 **[0012]** Sin embargo, de acuerdo con esta primera solución conocida, el núcleo y el revestimiento soportan solo los modos PL01 y PL11 a longitudes de onda superiores a 1500 nm, que es un número demasiado pequeño de modos en comparación con la demanda creciente de capacidad de transmisión por fibra.

10 **[0013]** Una segunda solución conocida se describe en el documento US 2013/007115, que divulga otro diseño específico para Fibras de pocos Modos. Sin embargo, al igual que la primera solución conocida divulgada en US 2013/007114, esta segunda solución conocida también consiste en una FMF que admite solo dos modos guiados.

[0014] Otro enfoque se describe en el documento de patente WO 2013/126254, que consiste en construir un enlace de fibra óptica concatenando dos fibras ópticas que tienen un retardo de grupo de modo diferencial entre los modos PL01 y PL11 con signos opuestos, para disminuir el valor absoluto del retardo de grupo de modo diferencial entre modos PL01 y PL11 modos en el enlace de fibra óptica.

15 **[0015]** Otros diseños conocidos han llevado a FMF que guían hasta 4 o incluso 6 modos.

[0016] El documento de patente PCT WO 2012/161809 describe, por lo tanto, una fibra óptica de pocos modos que comprende un núcleo rodeado por un revestimiento, que tiene un perfil de índice gradual que está estructurado para soportar la propagación de una pluralidad de modos de transporte de señal deseados, mientras se suprimen los modos. El núcleo y el revestimiento están configurados de forma tal que los modos no deseados tienen respectivos índices efectivos que son próximos o menores que el índice de revestimiento de modo que los modos no deseados son modos de fuga. La separación del índice entre el modo deseado que tiene el índice eficaz más bajo y el modo con fugas con el índice efectivo más alto es suficientemente grande para evitar sustancialmente el acoplamiento entre ellos. Las FMF que admite hasta 4 modos se muestran en ejemplos.

20 **[0017]** El documento de patente US 2012/0328255 divulga fibras ópticas de pocos modos que incluyen un núcleo de vidrio y un vidrio revestimiento alrededor y en contacto directo con el núcleo de vidrio. El núcleo de vidrio puede incluir un radio R_1 de aproximadamente $8 \mu\text{m}$ a aproximadamente $13 \mu\text{m}$; un perfil de índice de refracción gradual con un valor alfa entre aproximadamente 1,9 y 2,1 a una longitud de onda de 1550 nm; y un índice de refracción relativo máximo $\Delta_{1\text{MAX}}$ desde aproximadamente 0,6% hasta aproximadamente 0,95% con respecto al revestimiento de vidrio. El área efectiva del modo PL01 a 1550 nm puede estar comprendida entre $80 \mu\text{m}^2$ y $105 \mu\text{m}^2$ de manera que el núcleo soporta la propagación y transmisión de una señal óptica con modos X PL a una longitud de onda de 1550 nm, donde X es un número entero mayor que 1 y menor que 10. El revestimiento de vidrio puede incluir un índice de refracción relativo máximo $\Delta_{4\text{MAX}}$ tal que $\Delta_{1\text{MAX}} > \Delta_{4\text{MAX}}$. La FMF que soporta hasta 6 modos se muestran en ejemplos.

25 **[0018]** Aunque tales diseños son prometedores, no permiten reducir los retardos de modo diferencial tanto como se desee, y por lo tanto provoca límites en el alcance del sistema de transmisión. Además, los perfiles divulgados en ambos documentos no están optimizados para garantizar bajas pérdidas por curvatura y altas pérdidas por fugas, que, sin embargo, son cuestiones importantes para la FMF. En realidad, ninguno de los documentos conocidos relacionados con las FMF aborda el tema del diseño de una fibra de pocos modos que muestre bajas pérdidas por curvatura y altas pérdidas de fugas.

30 **[0019]** Por consiguiente, existe una necesidad de diseños para fibras ópticas de pocos modos que guíen 4 o más modos de PL, con pequeños retardos de grupo de modo diferencial, bajas pérdidas por curvatura y altas pérdidas de fuga.

3. Resumen de la invención

35 **[0020]** 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 único perfil de índice gradual con $\alpha \geq 1$, siendo α un parámetro adimensional que define la forma del perfil de índice del núcleo óptico, y el núcleo óptico que tiene un radio R_1 y un índice de refracción máximo n_0 , teniendo dicho revestimiento óptico en su borde exterior un índice de refracción n_{cl} . Dicho revestimiento óptico comprende una región de n_{trench} de índice de refracción deprimido, llamada zanja, que rodea el núcleo óptico, dicha zanja que tiene un radio interior R_2 , con $R_2 \geq R_1$, y un radio exterior R_3 , con $R_3 > R_2$.

40 **[0021]** Dicha fibra óptica es tal que dicho radio de núcleo óptico R_1 satisface un criterio C de calidad de comunicaciones ópticas definido por la siguiente ecuación:

$$C = 10 \cdot \frac{\text{Max}|DMGDs|}{(R_1^2 \cdot Dn_1)^3}$$

45 **[0020]** 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 único perfil de índice gradual con $\alpha \geq 1$, siendo α un parámetro adimensional que define la forma del perfil de índice del núcleo óptico, y el núcleo óptico que tiene un radio R_1 y un índice de refracción máximo n_0 , teniendo dicho revestimiento óptico en su borde exterior un índice de refracción n_{cl} . Dicho revestimiento óptico comprende una región de n_{trench} de índice de refracción deprimido, llamada zanja, que rodea el núcleo óptico, dicha zanja que tiene un radio interior R_2 , con $R_2 \geq R_1$, y un radio exterior R_3 , con $R_3 > R_2$.

50 **[0021]** Dicha fibra óptica es tal que dicho radio de núcleo óptico R_1 satisface un criterio C de calidad de comunicaciones ópticas definido por la siguiente ecuación:

55

60 donde DMGD es el retardo de grupo de modo diferencial entre dos modos guiados en dicha fibra óptica, donde $\text{Max}|DMGDs|$ es el valor máximo absoluto de DMGD entre cualquier combinación de modos guiados y donde $Dn_1 = n_0 - n_{cl}$, es la diferencia del índice núcleo-revestimiento en $\lambda = \lambda_c$, donde λ_c es una longitud de onda de transmisión central de una banda operativa para la cual se destina dicha fibra óptica. Además, dicho valor α de dicho perfil de índice gradual y dicho radio de núcleo óptico R_1 se eligen de modo que $R_1 \geq 13,5 \text{ mm}$ y $C < 18$.

[0022] Como se usa en el presente documento, y salvo que se especifique lo contrario, el término "perfil de índice gradual único" se refiere a un óptico núcleo que tiene un perfil de índice de refracción $n(r)$ definido de la siguiente manera:

$$n(r) = n_0 \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot \Delta \cdot \left(\frac{r}{R_1}\right)^\alpha} \quad r \leq R_1$$

dónde:

r es una variable representativa del radio de la fibra óptica, R_1 es el radio del núcleo óptico,

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

Δ es la diferencia del índice de refracción normalizado, con

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.

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 en escalón.

[0023] La graduación del índice se puede adaptar para reducir el disparidad de la velocidad del grupo entre los modos guiados por el núcleo de baja pérdida.

[0024] De este modo, adaptando el valor α del núcleo de índice gradual y el diámetro del núcleo, para satisfacer un criterio de calidad definido por la ecuación mencionada anteriormente, la invención proporciona una fibra óptica de pocos modos, que permite guiar un número aumentado de modos PL en comparación con las FMF de la técnica anterior, mientras se alcanza el retardo de grupo de modo diferencial más bajo. Tal DMGD bajo permite que todos los modos se detecten simultáneamente utilizando $2N \times 2N$ (N es el número total de modos espaciales, es decir, incluye degeneraciones del modo PL) técnicas MIMO ("Salida múltiple de entrada múltiple"), independientemente de los fenómenos de acoplamiento de modo. De este modo, el alcance del sistema es aumentado con respecto a la técnica anterior.

[0025] Se debe observar, sin embargo, que también se podrían usar técnicas de MIMO menos complejas para detectar grupos de modos que muestran diferencias de índice efectivo próximas, en lugar de detectar todos los modos individualmente.

[0026] Tener un radio de núcleo $R_1 \geq 13,5$ mm permite guiar un mayor número de modos, en comparación con las técnicas de la técnica anterior, tales como las descritas en los documentos de patente US 2012/0328255, US 2013/0071114 y US 2013/0071115.

[0027] Además, una fibra óptica asistida por zanja deprimida conduce a disminuir las pérdidas por de macro-curvatura al mejorar el confinamiento de los modos ópticos dentro del núcleo. Por lo tanto, la adición de una zanja en el revestimiento de una fibra de pocos modos, que cumple los criterios $R_1 \geq 13,5$ μm y $C < 18$, permite mejorar significativamente la compensación entre DMGD y las pérdidas por curvatura, como una zanja que es notorio para reducir la sensibilidad a la curvatura.

[0028] Preferiblemente, dicho radio de núcleo óptico R es tal que $R_1 \leq 20$ μm .

[0029] De acuerdo con una característica ventajosa, dicha zanja tiene parámetros que satisfacen la siguiente relación:

$$55 \leq 1000 \cdot |(R_3 - R_2) \cdot Dn_3 \cdot (R_1^2 \cdot Dn_1)| \leq 150$$

donde $Dn_3 = n_{\text{trench}} - n_{\text{Cl}}$ es la diferencia de índice zanja-revestimiento en $\lambda = \lambda_c$, donde λ_c es una longitud de onda de transmisión central de una banda operativa a la que se destina dicha fibra óptica.

[0030] Preferiblemente, $Dn_3 \leq -3 \cdot 10^{-3}$.

[0031] Una zanja que tiene tales características proporciona una fibra de pocos modos que muestra una buena compensación entre pérdidas por curvatura y pérdidas de fugas. Una fibra de pocos modos según la invención soporta un número aumentado de modos de PL en comparación con FMF de la técnica anterior, asegurando bajos DMGD, y muestra bajas pérdidas por curvatura ($< 100\text{dB/vuelta}$ en 10mm de radio de curvatura a 1550nm) para todos los modos guiados, para que puedan propagarse de manera robusta y altas pérdidas de fuga ($> 0,1\text{dB/m}$ a 1550nm) para todos los modos de fugas, de modo que puedan cortarse y/o atenuarse después de algunas decenas de metros.

[0032] De acuerdo con una realización de la invención, tal fibra óptica guía, al menos, 4 modos de PL, y preferiblemente de 4 a 16 modos de PL.

[0033] De acuerdo con otra realización de la invención, dicha fibra óptica guía, al menos, 6 modos PL, y preferiblemente 6 a 16 modos PL.

[0034] Un número tan elevado de modos guiados permite aumentar la capacidad de un sistema óptico que comprende tal

fibra óptica de pocos modos, y responde a la demanda de mayor ancho de banda en sistemas de transmisión óptica de larga distancia.

5 **[0035]** Una fibra de pocos modos de acuerdo con una realización de la invención, por lo tanto, guía un número aumentado de modos PL que pueden usarse de manera eficiente en transmisiones multiplexadas por división espacial, en comparación con las FMF de la técnica anterior.

10 **[0036]** De acuerdo con una primera realización, dicho núcleo óptico tiene un índice de refracción mínimo $n_1 = n_{Cl}$, y dicho revestimiento óptico también comprende una capa de revestimiento interior que rodea directamente dicho núcleo óptico, con un radio interior R_1 y un radio exterior $R_2 \geq R_1$, dicha capa de revestimiento interno tiene un índice de refracción n_2 constante, de manera que $n_2 \neq n_{Cl}$ y $n_2 > n_{trench}$.

15 **[0037]** Tal perfil asistido por una zanja de índice gradual permite cumplir el criterio de núcleo y el criterio de zanja expuesto en una realización de la invención. Además, una fibra de pocos modos tal, es fácil de fabricar y costos pequeños. La capa de revestimiento interior puede tener una diferencia de índice de refracción negativa o positiva con el núcleo.

20 **[0038]** Según una segunda realización, dicho núcleo óptico tiene un índice de refracción mínimo $n_1 = n_{Cl}$, y dicho revestimiento óptico también comprende una capa de revestimiento interior que rodea directamente dicho núcleo óptico, con un radio interior R_1 y un radio exterior $R_2 \geq R_1$, dicha capa de revestimiento interior tiene un índice de refracción n_2 constante, de modo que $n_2 = n_1$ y $n_2 > n_{trench}$.

25 **[0039]** Dicho perfil alternativo asistido por zanja de índice gradual permite cumplir el criterio de núcleo y el criterio de zanja expuesto en una realización de la invención. Además, una fibra de tan pocos modos es fácil de fabricar y es poco costosa. La capa de revestimiento interior puede tener una diferencia de índice de refracción negativa o positiva con el núcleo.

30 **[0040]** De acuerdo con una tercera realización, dicho núcleo óptico tiene un índice de refracción mínimo que es igual a n_{Cl} , y dicho revestimiento óptico también comprende una capa de revestimiento interno que rodea directamente dicho núcleo óptico, con un radio interno R_1 y un radio exterior $R_2 \geq R_1$, siendo dicha capa de revestimiento interior una extensión de dicho único perfil de índice gradual de dicho núcleo óptico, y en el que la capa interna tiene un índice de refracción mínimo $n_1 = n_{trench}$.

35 **[0041]** Aunque fabricar tal fibra de pocos modos es de alguna manera más difícil, en comparación con las realizaciones primera y segunda, dicho perfil asistido por zanja de índice gradual permite optimizar mejor el parámetro α del perfil de índice gradual.

40 **[0042]** De acuerdo con un aspecto de la invención, una fibra óptica de este tipo soporta cuatro modos guiados PL, y es tal que $\text{Max}|DMGDs| < 20$ ps/km y preferiblemente $\text{Max}|DMGDs| < 10$ ps/km a $\lambda = \lambda_C$ (por ejemplo $\lambda_C = 1550\text{nm}$), y es tal que $\text{Max}|DMGDs| < 30$ ps/km y preferiblemente $\text{Max}|DMGDs| < 20$ 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 operativa para la cual se destina dicha fibra óptica y donde $2\delta\lambda$ es un ancho de dicha banda operativa, preferiblemente $\delta\lambda = 20\text{nm}$ (por ejemplo para $\lambda \in [1530\text{nm}; 1570\text{nm}]$).

45 **[0043]** Se observa que las FMF descritas en este documento y en todo el documento son adecuadas para su uso dentro de, al menos, toda la "banda C", pero también en algunos casos S-, C-, U- y bandas L-.

50 **[0044]** De acuerdo con otro aspecto de la invención, una fibra óptica de este tipo soporta seis modos guiados PL, y es tal que $\text{Max}|DMGDs| < 25$ ps/km y preferiblemente $\text{Max}|DMGDs| < 15$ ps/km en $\lambda = \lambda_C$ (por ejemplo $\lambda_C = 1550\text{nm}$), y es tal que $\text{Max}|DMGDs| < 50$ ps/km y preferiblemente $\text{Max}|DMGDs| < 30$ 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 operativa para la cual se destina dicha fibra óptica y donde $2\delta\lambda$ es un ancho de dicha banda operativa, preferiblemente $\delta\lambda = 20\text{nm}$ (por ejemplo para $\lambda \in [1530\text{nm}; 1570\text{nm}]$).

55 **[0045]** Los retardos de grupo de modo diferencial son por lo tanto muy bajas en toda la banda C extendida, mientras que se cumple el desafío de aumentar el número de modos PL hasta seis.

60 **[0046]** De acuerdo con otro aspecto de la invención, una fibra óptica de este tipo soporta nueve modos guiados PL, y es tal que $\text{Max}|DMGDs| < 100$ ps/km y preferiblemente $\text{Max}|DMGDs| < 60$ ps/km a $\lambda = \lambda_C$ (por ejemplo $\lambda_C = 1550\text{nm}$), y es tal que $\text{Max}|DMGDs| < 200$ ps/km y preferiblemente $\text{Max}|DMGDs| < 120$ 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 operativa para la cual se destina dicha fibra óptica y donde $2\delta\lambda$ es un ancho de dicha banda operativa, preferiblemente $\delta\lambda = 20\text{nm}$ (por ejemplo para $\lambda \in [1530\text{nm}; 1570\text{nm}]$).

65 **[0047]** Los retardos de grupo de modo diferencial son por lo tanto bastante bajos en toda la banda C extendida (y más generalmente en cualquier banda de longitud de onda estandarizada: banda C, banda L, banda U, banda S ...)

mientras el desafío de aumentar el número de modos de PL hasta nueve se cumple.

[0048] De acuerdo con otro aspecto más de la invención, una fibra óptica de este tipo soporta doce modos guiados PL, y es tal que $\text{Max}|DMGDs| < 150\text{ps} / \text{km}$ y preferiblemente $\text{Max}|DMGDs| < 120\text{ps} / \text{km}$ a $\lambda = \lambda_C$ (por ejemplo $\lambda_C = 1550\text{nm}$), y es tal que $\text{Max}|DMGDs| < 300\text{ps} / \text{km}$ y preferiblemente $\text{Max}|DMGDs| < 250\text{ps} / \text{km}$ 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 operativa para la cual se destina dicha fibra óptica y donde $2\delta\lambda$ es un ancho de dicha banda operativa, preferiblemente $\delta\lambda = 20\text{nm}$ (por ejemplo para $\lambda \in [1530\text{nm}; 1570\text{nm}]$).

[0049] Los retardos de grupo de modo diferencial siguen siendo bajos en toda la banda C extendida (y más generalmente en cualquier banda de longitud de onda estandarizada: banda C, banda L, banda U, banda S ...), mientras que se alcanza el reto de aumentar el número de modos de PL hasta doce, lo cual es un aumento muy interesante en la capacidad de fibra.

[0050] De acuerdo con otro aspecto más de la invención, dicha fibra óptica soporta dieciséis modos guiados PL, y es tal que $\text{Max}|DMGDs| < 300 \text{ ps/km}$ y preferiblemente $\text{Max}|DMGDs| < 250 \text{ ps/km}$ a $\lambda = \lambda_C$ (para ejemplo $\lambda_C = 1550\text{nm}$), y es tal que $\text{Max}|DMGDs| < 600 \text{ ps/km}$ y preferiblemente $\text{Max}|DMGDs| < 500 \text{ ps/km}$ 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 operativa para la cual se destina dicha fibra óptica y donde $2\delta\lambda$ es un ancho de dicha banda operativa, preferiblemente $\delta\lambda = 20\text{nm}$ (por ejemplo para $\lambda \in [1530\text{nm}; 1570\text{nm}]$).

[0051] Los retardos de grupo de modo diferencial son por lo tanto suficientemente bajos en toda la banda C extendida (y más generalmente en cualquier banda de longitud de onda estandarizada: banda C, banda L, banda U, banda S ...) para garantizar un buen alcance del sistema, mientras que la cantidad de modos PL ha aumentado enormemente hasta dieciséis.

[0052] Según una característica ventajosa, los modos de PL guiados por dicha fibra óptica tienen áreas efectivas, $A_{\text{eff}} < 400 \mu\text{m}^2$, preferiblemente $A_{\text{eff}} < 350 \mu\text{m}^2$, y pérdidas por curvatura $< 100\text{dB/vuelta}$, preferiblemente $< 50\text{dB/vuelta}$, para un radio de curvatura de 10 mm a 1550 nm, y los modos de fuga de PL tienen pérdidas de fuga $> 0,1\text{dB/m}$, preferiblemente $> 0,5 \text{ dB/m}$, en $\lambda = \lambda_C$.

[0053] Tal fibra de pocos modos muestra una muy buena compensación entre pérdidas por curvatura y pérdidas de fugas. Tales áreas efectivas relativamente grandes limitan la no linealidad intramodos.

[0054] 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.

[0055] Tal enlace óptico puede comprender cualquier número de fibras ópticas concatenadas, siempre que una de ellas, al menos, cumpla con las características establecidas en la invención. Tal enlace óptico también puede comprender varias fibras ópticas, cumpliendo todas ellas con las características de la invención.

[0056] Otro aspecto de la descripción se refiere a un sistema óptico que comprende, al menos, una fibra óptica como se describió aquí anteriormente en cualquiera de sus realizaciones.

5. Lista de figuras

[0057] Otras características y ventajas de las realizaciones de la invención aparecerán a partir de la siguiente descripción, dada a modo de ejemplos indicativos y no exhaustivos y de los dibujos adjuntos, de los cuales:

- La figura 1 representa esquemáticamente una sección transversal de una fibra óptica de acuerdo con una o más realizaciones aquí descritas;

- La figura 2A proporciona gráficamente el perfil de índice de refracción de una fibra óptica de acuerdo con una primera realización de la invención;

- La figura 2B proporciona gráficamente el perfil de índice de refracción de una fibra óptica de acuerdo con una segunda realización de la invención;

- La figura 2C proporciona gráficamente el perfil de índice de refracción de una fibra óptica de acuerdo con una tercera realización de la invención;

- La figura 3 ilustra cómo los retardos de Grupo de Modo Diferencial disminuyen como una función de R_1 para fibras pocos modos que soportan de 6 a 16 modos guiados PL para estructuras con ayuda de zanjas de índice gradual de acuerdo con la invención;

- La figura 4 muestra el criterio C establecido en la invención para fibras de modo poco compatibles que soportan de 6 a 16 modos guiados PL en función de R_1 para estructuras asistidas por zanja con índice gradual de acuerdo con la invención;

- La figura 5 representa gráficamente el $\text{Max}|DMGD|$ como una función de la longitud de onda para algunas realizaciones de la invención;

- La figura 6 ilustra el $\text{Max}|DMGD|$ como una función de α para algunas realizaciones de la invención;

- La figura 7 ilustra un enlace óptico de acuerdo con una realización de la invención;

- Las figuras 8A y 8B ilustran realizaciones de un sistema óptico de acuerdo con la invención.

6. Descripción detallada

[0058] El principio general de la invención es proponer una fibra óptica de pocos modos de índice gradual asistido por zanja cuidadosamente diseñada, que muestra un retardo de grupo de modo diferencial reducido y que soporta más modos de PL que las FMF de la técnica anterior. Más precisamente, el propósito de tal diseño es proporcionar una compensación mejorada con respecto a las FMF de la técnica anterior entre el reducido retardo de grupo de modo diferencial, la pérdida por curvatura reducida y la pérdida de fugas aumentada.

[0059] La luz que viaja en una fibra óptica realmente forma modos de tipo híbrido, que se denominan generalmente modos PL (polarización lineal). Los modos PL_{0p} tienen grados de libertad de polarización de arrastre y son dos veces degenerados, los modos PL_{mp} con $m \geq 1$ son cuatro veces degenerados. Estas degeneraciones no se cuentan al designar el número de modos PL que se propagan en la fibra. Por lo tanto, una fibra óptica de pocos modos con dos modos de PL admite la propagación de todos los modos PL_{01} y PL_{11} , o una fibra de pocos modos que guía 6 modos PL que soporta la propagación de todos los modos PL_{01} , PL_{11} , PL_{02} , PL_{21} , PL_{12} y PL_{31} .

[0060] Ahora se hará referencia en detalle a realizaciones de fibras ópticas de pocos modos, ejemplos de los cuales se ilustran en los dibujos adjuntos. Siempre que sea posible, se usarán los mismos números de referencia en todos los dibujos para referirse a las mismas partes o similares.

[0061] Una realización de una fibra óptica de pocos modos de acuerdo con la invención se representa esquemáticamente en sección transversal en la figura 1. La fibra óptica 10 generalmente tiene un núcleo de vidrio 20

rodeado por un revestimiento de vidrio. El núcleo de vidrio 20 generalmente tiene un radio R_1 desde aproximadamente 13,5 μm a aproximadamente 20 μm . El revestimiento generalmente tiene un radio interno R_1 y un radio exterior R_4 . En las realizaciones mostradas y descritas en este documento, el núcleo 20 y el revestimiento generalmente constan de sílice, específicamente vidrio de sílice. La sección transversal de la fibra óptica 10 puede ser generalmente circular-simétrica con respecto al centro del núcleo 20. 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 manera que el radio R_4 puede ser mayor o menor que 62,5 μm . La fibra óptica 10 también comprende un revestimiento 60 de radio interior R_4 y de radio exterior R_5 . Dicho revestimiento puede comprender varias capas, y puede ser especialmente un recubrimiento de doble capa, aunque estas diferentes capas no se muestran en la figura 1. Debe señalarse que R_4 y R_5 son los límites inferior y superior del revestimiento, cualquiera que sea el número de capas en el medio. En algunas realizaciones descritas en este documento, el radio R_5 es aproximadamente 122,5 μm (pero podría ser mayor o menor de 122,5 μm). En realizaciones alternativas, otras dimensiones podrían ser tales que $R_4 = 40 \mu\text{m}$ o $R_4 = 50 \mu\text{m}$, y $R_5 = 62,5 \mu\text{m}$.

[0062] La figura 2A representa el perfil de índice de refracción $n(r)$ de la fibra óptica 10 de acuerdo con una primera realización de la invención. Describe la relación entre el valor n del índice de refracción y la distancia r desde el centro de la fibra óptica. El eje x representa la posición radial con $x = 0$ que representa el centro de la región del núcleo, y el eje y representa el índice de refracción, expresado como una diferencia de índice Dn a menos que se indique lo contrario.

[0063] En esa primera realización, la fibra óptica 10 tiene un núcleo óptico 20 que tiene un perfil de índice de refracción $n(r)$ definido de la siguiente manera:

$$n(r) = n_0 \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot \Delta \cdot \left(\frac{r}{R_1}\right)^\alpha} \quad r \leq R_1$$

dónde:

r es una variable representativa del radio de la fibra óptica, R_1 es el radio del núcleo óptico,

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

Δ es la diferencia del índice de refracción normalizado, con

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.

[0064] El perfil de índice de refracción alfa del núcleo óptico 20 permite reducir la dispersión intermodal de la fibra óptica 10.

[0065] El núcleo óptico 20 está rodeado directamente por un revestimiento óptico, que comprende al menos un anillo de índice deprimido 40, también llamado zanja, con radio interior R_2 y radio exterior R_3 , y una capa de revestimiento exterior 50 con radio interior R_3 . En algunas realizaciones, dicha capa externa de revestimiento 50 comprende vidrio de sílice puro (SiO_2) y su índice de refracción n_{Cl} es, por lo tanto, el del vidrio de sílice. Esta zanja 40 tiene una diferencia de índice de refracción negativa $Dn_3 = n_{\text{trench}} - n_{Cl}$ con respecto al índice de refracción del revestimiento exterior, y su posición y tamaño están diseñados para mejorar la resistencia a la pérdida por flexión de la fibra.

[0066] Preferiblemente, la zanja 40 está diseñada para cumplir el siguiente criterio:

$$55 \leq 1000 \cdot \left| (R_3 - R_2) \cdot Dn_3 \cdot (R_1^2 \cdot Dn_1) \right| \leq 150$$

donde $Dn_3 = n_{\text{trench}} - n_{Cl}$ es la diferencia de índice de revestimiento de zanja en $\lambda = \lambda C$, donde λC es la longitud de onda central de cualquier banda operativa a la que se destina la fibra óptica. Tal criterio permite alcanzar un buen equilibrio entre las pérdidas por curvatura y las pérdidas por fugas en la fibra.

[0067] El revestimiento también puede incluir opcionalmente una capa de revestimiento interior 30, con un radio interior R_1 y un radio exterior R_2 . La zanja 40 puede, por lo tanto, separarse del núcleo 20 mediante la capa interior de revestimiento 30. Alternativamente, la zanja 40 puede rodear y contactar directamente la porción de núcleo 20.

[0068] En esta primera realización, el revestimiento interior 30 tiene un índice de refracción constante n_2 , tal que $n_2 > n_{\text{trench}}$, y que puede mostrar una diferencia de índice de refracción negativa o positiva (mostrada en líneas discontinuas en la figura 2A) $Dn_2 = n_2 - n_{Cl}$ con respecto al revestimiento exterior de fibra óptica.

[0069] Las diferentes porciones 30, 40, 50 en el revestimiento pueden comprender vidrio de sílice pura (SiO_2), vidrio de sílice con uno o más dopantes, que aumentan el índice de refracción (por ejemplo, GeO_2 o cualquier otro dopante conocido), como cuando la parte del revestimiento está "dopado ascendente", o vidrio de sílice con un dopante, que

disminuye el índice de refracción, como el flúor, tal como cuando la parte del revestimiento está dopada descendente (por ejemplo, para la zanja 40).

[0070] Aunque no se ilustra en la figura 1, el revestimiento externo 50 también puede comprender otras porciones o capas de índices de refracción más bajos o más altos, para $r > R_3$.

5 [0071] En la primera realización ilustrada por la figura 2A, el índice de refracción mínimo del núcleo n_1 es igual al índice de refracción del revestimiento exterior n_{Cl} .

[0072] La zanja 40 con dopado descendente puede proporcionar una menor pérdida por curvatura1.

10 [0073] La figura 2B representa el perfil de índice de refracción $n(r)$ de una fibra óptica de acuerdo con una segunda realización de la invención. Tal perfil difiere del de la primera realización en que el índice de refracción mínimo del núcleo n_1 no es igual al índice de refracción del revestimiento exterior n_{Cl} pero puede mostrar una diferencia de índice de refracción negativa o positiva (mostrado en líneas discontinuas en la figura 2B) con respecto al revestimiento exterior de fibra óptica. En caso de que el revestimiento comprenda una capa interior de revestimiento 30, el índice de refracción mínimo del núcleo n_1 es igual al índice de refracción constante del revestimiento interno n_2 , que puede mostrar un negativo o un positivo (mostrado en líneas discontinuas en la figura 2B) diferencia de índice de refracción $Dn_2 = n_2 - n_{Cl}$ con respecto al revestimiento exterior de fibra óptica.

15 [0074] Como en la primera realización, el revestimiento externo 50 también puede comprender otras porciones o capas de índices de refracción más bajos o más altos, para $r > R_3$.

[0075] Como en la primera realización, la zanja 40 está diseñada preferiblemente para cumplir el siguiente criterio:

20
$$55 \leq 1000 \cdot |(R_3 - R_2) \cdot Dn_3 \cdot (R_1^2 \cdot Dn_1)| \leq 150$$

donde $Dn_3 = n_{trench} - n_{Cl}$ es la diferencia de índice de revestimiento de zanja en $\lambda = \lambda C$, donde λC es la longitud de onda central de cualquier banda operativa a la que se destina la fibra óptica.

25 [0076] La figura 2C representa el perfil de índice de refracción $n(r)$ de una fibra óptica de acuerdo con una tercera realización de la invención.

[0077] En esta tercera realización, la capa de revestimiento interior 30 es una extensión del núcleo de índice gradual 20, de manera que tanto el núcleo óptico 20 como la capa de revestimiento interior 30 tienen un perfil de índice de refracción $n(r)$ definido de la siguiente manera:

30
$$n(r) = n_0 \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot \Delta \cdot \left(\frac{r}{R_2}\right)^\alpha} \quad r \leq R_2$$

dónde:

r es una variable representativa del radio de la fibra óptica, R_2 es el radio exterior de la capa de revestimiento interior 30,

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

35 Δ es la diferencia de índice de refracción normalizada con n_1 es el índice de refracción mínimo de la capa de revestimiento interior (es decir, el índice de refracción en el radio R_2),

n_0 es el índice de refracción máximo del núcleo óptico,

α es un parámetro adimensional que define la forma del perfil de índice tanto del núcleo óptico como del revestimiento interno capa.

40 [0078] Por lo tanto, en esta tercera realización, el término "perfil de índice gradual α único" tiene un significado ligeramente diferente de en comparación con las dos primeras realizaciones, ya que este perfil de índice gradual va más allá del núcleo óptico hasta el borde exterior de la capa de revestimiento interior.

45 [0079] El revestimiento óptico también comprende al menos un anillo de índice deprimido 40, con un radio interior R_2 y un radio exterior R_3 , y una capa exterior de revestimiento 50 con un radio interno R_3 . En algunas realizaciones, dicha capa externa de revestimiento 50 consta de vidrio de sílice pura (SiO_2) y su índice de refracción n_{Cl} es, por lo tanto, la del vidrio de sílice. La zanja 40 tiene una diferencia de índice de refracción negativa $Dn_3 = n_{trench} - n_{Cl}$ con respecto al índice de refracción del revestimiento exterior, y su posición y tamaño están diseñados para mejorar la resistencia a la pérdida por flexión de la fibra.

50 [0080] Como en las realizaciones primera y segunda, el revestimiento exterior 50 también puede comprender otras porciones o capas de índices de refracción más bajos o más altos, para $r > R_3$.

[0081] Como en las realizaciones primera y segunda, la zanja 40 está diseñada preferiblemente para cumplir el siguiente criterio:

$$55 \leq 1000 \cdot |(R_3 - R_2) \cdot Dn_3 \cdot (R_1^2 \cdot Dn_1)| \leq 150$$

55 donde $Dn_3 = n_{trench} - n_{Cl}$ es la diferencia de índice de revestimiento de zanja en $\lambda = \lambda C$, donde λC es la longitud de onda central de cualquier banda operativa a la que se destina la fibra óptica.

[0082] La figura 3 ilustra cómo el máximo del retardo de grupo de modo diferencial $Max|DMGD|$ entre dos cualquiera modos de PL guiados en la fibra óptica disminuyen en función del radio del núcleo R_1 para las FMF que guían los

modos 6, 9, 12 y 16 de acuerdo con una de las realizaciones de las figuras 2A-2C. El eje x representa el radio del núcleo de la fibra R_1 , que varía de 12 a 16 μm . El eje y representa el Max|DMGD| expresado como ps/km en una escala logarítmica. La curva 31 corresponde a una FMF que guía 6 modos PL; la curva 32 corresponde a una FMF que guía 9 modos PL; la curva 33 corresponde a una FMF que guía 12 modos PL, mientras que la curva 34 corresponde a una FMF que guía 16 modos PL.

[0083] La figura 4 ilustra conjuntamente cómo el criterio

$$C = 10 \cdot \frac{\text{Max|DMGDs|}}{(R_1^2 \cdot Dn_1)^3},$$

donde DMGD es el retardo de Grupo de Modo Diferencial entre dos modos guiados en dicha fibra óptica y donde $Dn_1 = n_0 - n_{cl}$ es la diferencia de índice núcleo-revestimiento en $\lambda = \lambda C$, donde λC es la longitud de onda central de cualquier banda operativa a la que se destina la fibra óptica, también disminuye como una función del radio del núcleo R_1 para las FMF que guían los modos 6, 9, 12 y 16 de acuerdo con una de las realizaciones de las figuras 2A-2C. El eje x representa el radio del núcleo de la fibra R_1 , que varía de 12 a 16 μm . El eje y representa el criterio C que va de 0 a 30. La curva 41 corresponde a una FMF que guía 6 modos PL; la curva 42 corresponde a una FMF guiando 9 modos de PL; la curva 43 corresponde a una FMF que guía 12 modos PL, mientras que la curva 44 corresponde a una FMF que guía 16 modos PL.

[0084] Como puede observarse a partir de ambas figuras, se puede obtener una buena compensación estableciendo el radio del núcleo $R_1 \geq 13,5 \mu\text{m}$. Esto permite alcanzar valores bajos para Max|DMGD| , cualquiera que sea el número de modos guiados PL en la fibra. Al configurar el límite inferior del radio del núcleo a 13,5 μm , es posible guiar en la FMF un gran número de modos de PL, y así alcanzar una buena capacidad por fibra, mientras que, gracias a la baja Max|DMGD| valores, cubre largas distancias.

[0085] Una vez que el radio del núcleo se ha establecido en un valor mínimo de 13,5 μm , se puede deducir de la figura 4 que el límite superior adecuado para el criterio C se puede establecer en un valor de 18: $C < 18$. Dicho límite superior admisible para la FMF de la invención se ilustra mediante una línea recta horizontal 45 en la figura 4.

[0086] Como se puede observar a partir de las figuras 3 y 4, para las FMF que admiten 6 modos guiados PL, la

$$V = \frac{2\pi R_1}{\lambda} \sqrt{n_0^2 - n_{cl}^2},$$

frecuencia normalizada

donde λ es la longitud de onda operativa) está preferiblemente comprendida entre 7,8 y 9,8. El Max|DMGD| es preferiblemente $< 25 \text{ ps/km}$, y más preferiblemente $< 15 \text{ ps/km}$, para λ , aquí 1550nm (y más generalmente en $\lambda = \lambda C$, donde λC es la longitud de onda central de cualquier banda operativa a la que se destina la fibra óptica). El Max|DMGD| también es preferiblemente $< 50 \text{ ps/km}$ y más preferiblemente $< 30 \text{ ps/km}$ de 1530 a 1570nm (y más generalmente para cualquier banda de longitud de onda operativa $[\lambda - \delta\lambda; \lambda + \delta\lambda]$ donde $2\delta\lambda$ es un ancho de dicha banda operativa, preferiblemente $\delta\lambda = 20\text{nm}$, tal como la banda C, o la banda L, S o U para ejemplo).

[0087] Para las FMF que soportan 9 modos guiados PL, V está preferiblemente entre 9,8 y 11,8. El Max|DMGD| es preferiblemente $< 100 \text{ ps/km}$, y más preferiblemente $< 60 \text{ ps/km}$, para λ , aquí 1550nm (y más generalmente en $\lambda = \lambda C$, donde λC es la central longitud de onda de cualquier banda operativa para la cual está destinada la fibra óptica). El Max|DMGD| también es preferiblemente $< 200 \text{ ps/km}$ y más preferiblemente $< 120 \text{ ps/km}$ de 1530 a 1570nm (y más generalmente para cualquier banda de longitud de onda operativa $[\lambda C - \delta\lambda; \lambda C + \delta\lambda]$ donde $2\delta\lambda$ es un ancho de dicha banda operativa, preferiblemente $\delta\lambda = 20\text{nm}$, como la banda C, o la L, S o U, por ejemplo).

[0088] Para las FMF que soportan 12 modos guiados PL, V está preferiblemente entre 11,8 y 13,8. El Max|DMGD| es preferiblemente $< 150 \text{ ps/km}$ y más preferiblemente $< 120 \text{ ps/km}$, en λ , aquí 1550nm (y más generalmente en $\lambda = \lambda C$, donde λC es la central longitud de onda de cualquier banda operativa para la cual está destinada la fibra óptica). El Max|DMGD| también es preferiblemente $< 300 \text{ ps/km}$ y más preferiblemente $< 250 \text{ ps/km}$ de 1530 a 1570nm (y más generalmente para cualquier banda de longitud de onda operativa $[\lambda C - \delta\lambda; \lambda C + \delta\lambda]$ donde $2\delta\lambda$ es un ancho de dicha banda operativa, preferiblemente $\delta\lambda = 20 \text{ nm}$, como la banda C o la banda L, S o U, por ejemplo).

[0089] Para las FMF que soportan 16 modos guiados PL, V está comprendida preferiblemente entre 13,8 y 15,9. El Max|DMGD| es preferiblemente $< 300 \text{ ps/km}$ y más preferiblemente $< 250 \text{ ps/km}$, en λ , aquí 1550nm (y más generalmente en $\lambda = \lambda C$, donde λC es la longitud de onda central de cualquier banda operativa para la cual está destinada la fibra óptica). El Max|DMGD| también es preferiblemente $< 600 \text{ ps/km}$ y más preferiblemente $< 500 \text{ ps/km}$ de 1530 a 1570nm (y más generalmente para cualquier banda de longitud de onda operativa $[\lambda C - \delta\lambda; \lambda C + \delta\lambda]$ donde $2\delta\lambda$ es un ancho de dicha banda operativa, preferiblemente $\delta\lambda = 20\text{nm}$, como la banda C o la banda L, S o U, por ejemplo).

[0090] Además, para las FMF que soportan 4 modos guiados PL, la frecuencia normalizada V está preferiblemente comprendida entre 5,7 y 7,8. El Max|DMGD| es preferiblemente $< 20 \text{ ps/km}$, y más preferiblemente $< 10 \text{ ps/km}$, a 1550nm (y más generalmente a $\lambda = \lambda C$, donde λC es la longitud de onda central de cualquier banda operativa para la cual está destinada la fibra óptica). Max|DMGD| también es preferiblemente $< 30 \text{ ps/km}$ y más preferiblemente $< 20 \text{ ps/km}$ de 1530 a 1570nm (y más generalmente para cualquier banda de longitud de onda operativa $[\lambda C - \delta\lambda; \lambda C + \delta\lambda]$ donde $2\delta\lambda$ es un ancho de dicha banda operativa, preferiblemente $\delta\lambda = 20\text{nm}$, como la banda C o la banda L, S o U, por ejemplo).

[0091] Todos los modos guiados PL de las FMF de acuerdo con una realización de la invención tienen áreas efectivas, $A_{\text{eff}} < 400 \mu\text{m}^2$, preferiblemente $< 350 \mu\text{m}^2$, y pérdidas por curvatura $< 100 \text{ dB/vuelta}$, preferiblemente $< 50 \text{ dB/vuelta}$, en radio de curvatura de 10mm a 1550nm, y todos los modos de fuga PL tienen pérdidas de fuga $>$

0,1dB/m, preferiblemente > 0,5 dB/m, a 1550nm, por lo que se cortan después de algunas decenas de metros de propagación (> 19,34dB (pérdidas de fuga)) (y de manera más general en $\lambda = \lambda_C$, donde λ_C es la longitud de onda central de cualquier banda operativa a la que se destina la fibra óptica). Como se utiliza en el presente 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, PL01), a una longitud de onda de 1550 nm, a menos que se especifique lo contrario.

[0092] Aunque no se ilustra en las figuras 3 y 4, para las FMF que admiten 4 modos guiados PL, V está comprendida preferiblemente entre 5,7 y 7,8. El $Max|DMGD|$ es preferiblemente < 20 ps/km, y más preferiblemente < 10ps/km, para λ , aquí 1550nm (y más generalmente a $\lambda = \lambda_C$, donde λ_C es la longitud de onda central de cualquier banda operativa para la cual está destinada la fibra óptica). El $Max|DMGD|$ también es preferiblemente < 30 ps/km y más preferiblemente < 20 ps/km desde 1530 hasta 1570nm (y más generalmente para cualquier banda de longitud de onda operativa $[\lambda_C - \delta\lambda; \lambda_C + \delta\lambda]$ donde $2\delta\lambda$ es un ancho de dicha banda operativa, preferiblemente $\delta\lambda = 20 \text{ nm}$, como la banda C, o la L, S o U, por ejemplo).

[0093] La tabla 1 proporciona los parámetros de los perfiles de índice de ejemplos de FMF de acuerdo con la realización de la figura 2B, y los resultados en $Max|DMGD|$, núcleo específico Criterio C y criterio de zanja T.

Tabla 1:

	Ej. 0	Ej. 1	Ej. 2	Ej.3	Ej. 4	Ej. 5	Ej. 6	Ej. 7	Ej. 8	Ej.9	Ej.10
# Modos PL guiados	4	6			9		12		16		
Alfa	1,9581	1,949	1,951	1,954	1,944	1,945	1,934	1,934	1,926	1,928	1,931
R ₁ (μm)	14,00	13,50	14,00	15,00	14,00	15,00	14,00	15,00	14,00	15,00	16,00
Dn ₁ (x10 ³ a 1550 nm)	6,31	10,69	9,95	8,66	14,4	12,55	19,65	17,13	26,02	22,7	19,06
R ₂ (μm)	15,88	14,66	15,30	16,56	15,05	16,12	14,91	15,44	14,68	15,98	16,63
Dn ₂ (x10 ³ a 1550 nm)	0	0	0	0	0,12	0	-6,59	0	-0,89	-1,06	0,2
R ₃ (μm)	22,23	20,53	21,42	23,18	19,57	22,56	19,39	19,30	19,08	20,77	20,41
Dn ₃ (x10 ³ a 1550 nm)	-4,81	-4,81	-4,81	-4,81	-5,78	-4,81	-5,78	-3,85	-5,78	-5,78	-4,81
Max DMGD	2,9	11,3	8,6	8,0	25,4	21,2	73,5	87,3	152,7	124,1	96,1
Criterio núcleo	15,3	15,3	11,6	10,8	11,3	9,4	12,9	15,2	11,5	9,3	8,3
Criterio zanja	37,8	55,00	57,4	62,1	73,7	87,6	99,6	57,3	129,8	141,5	88,7

$$C = 10 \cdot \frac{Max|DMGDs|}{(R_1^2 \cdot Dn_1)^3}$$

[0094] En la tabla 1, el criterio central es el parámetro C tal que

El criterio T se

$$T = 1000 \cdot [(R_3 - R_2) \cdot Dn_3 \cdot (R_1^2 \cdot Dn_1)]$$

define como

Según una realización preferida $55 \leq T \leq 150$.

Como puede observarse, para el ejemplo 0 de una FMF que guía 4 modos PL, el criterio T no se cumple, ya que $T = 37,8$, aunque el criterio C se cumple con $C = 15,3 < 18$. Sin embargo, con un número "bajo" de modos PL (es decir, 4), la compensación entre las pérdidas por curvatura y las pérdidas por fugas se cumple con mayor facilidad.

[0095] La tabla 2 proporciona las características de los modos PL de los ejemplos de la tabla 1 que soportan 4 modos guiados PL, es decir, modos PL01, PL11, PL21 y PL02.

Tabla 2:

Ej. 0	Dneff (x10 ³)	Pérdidas de fuga (dB/m)	A _{eff} (μm ²)	CD (ps/nm-km)	Pérdidas por curvatura (dB/vuelta)	DMGD frente LP101 (pskm)
PL01	4,68	/	158	20,7	0,0	/
PL11	3,01	/	213	20,9	0,0	-2,4
PL21	1,36	/	286	21,2	1,5	0,5
PL02	1,37	/	323	21,3	4,0	-1,5
PL12	<0	13,7				
PL31	<0	2,4				

[0096] En la tabla 2, así como en las tablas 3 a 6 descritas a continuación, Dneff representa la diferencia de índice efectiva, CD representa la dispersión cromática expresada como ps/nm-km (la dispersión cromática es la suma de la dispersión del material, la dispersión de guía de onda y la dispersión intermodal) y las pérdidas por curvatura, expresadas como dB/vuelta, se dan en un radio de curvatura de 10 mm. La A_{eff} expresada como μm² designa el área efectiva del modo guiado PL. El retardo de grupo de modo diferencial DMGD se mide con respecto al primer modo guiado PL01 y se expresa como ps/km. Los PL12 y PL31 son modos de fuga.

ES 2 665 751 T3

[0097] La tabla 3 proporciona las características de los modos PL de los ejemplos de la tabla 1 que soportan 6 modos guiados PL, es decir, los ejemplos 1, 2 y 3, a una longitud de onda $\lambda = 1550\text{nm}$.

Tabla 3:

5

Ej.1	Dneff ($\times 10^3$)	Pérdidas de fuga (dB/m)	Aeff (μm^2)	CD (ps/nm-km)	Pérdidas por curvatura (dB/vuelta)	DMGD frente PL01
PL01	8,5	/	117	20,0	0,0	/
PL11	6,25	/	157	20,3	0,0	10,3
PL21	4,01	/	211	20,5	0,0	-8,5
PL02	4,02	/	238	20,5	0,0	-8,0
PL12	1,79	/	254	20,7	6,5	-7,6
PL31	1,77	/	254	20,8	1,3	1,0
PL03	<0	53,4				
PL22	<0	33,5				
PL41	<0	3,0				
Ej. 2	Dneff ($\times 10^3$)	Pérdidas de fuga (dB/m)	Aeff (μm^2)	CD (ps/nm-km)	Pérdidas por curvatura (dB/vuelta)	DMGD frente PL01
PL01	7,71	/	126	20,1	0,0	/
PL11	5,62	/	169	20,4	0,0	-7,6
PL21	3,54	/	227	20,6	0,0	-6,5
PL02	3,55	/	256	20,6	0,0	-7,8
PL12	1,48	/	274	20,9	7,3	-7,5
PL31	1,46	/	273	20,9	1,6	0,8
PL03	<0	37,8				
PL22	<0	21,4				
PL41	<0	1,8				
Ej. 3	Dneff ($\times 10^3$)	Pérdidas de fuga (dB/m)	Aeff (μm^2)	CD (ps/nm-km)	Pérdidas por curvatura (dB/vuelta)	DMGD frente LP01
PL01	6,70	/	144	20,3	0,0	/
PL11	4,87	/	194	20,5	0,0	-4,4
PL21	3,06	/	260	20,7	0,0	-4,3
PL02	3,07	/	294	20,7	0,1	-7,5
PL12	1,27	/	314	21,1	7,6	-5,2
PL31	1,25	/	313	21,0	2,0	0,5
PL03	<0	37,8				
PL22	<0	21,4				
PL41	<0	1,8				
PL03, PL22 y PL41 son modos de fuga						

[0098] La tabla 4 proporciona las características de los modos PL de los ejemplos de la tabla 1 que soportan 9 modos guiados PL, es decir los ejemplos 4 y 5, a una longitud de onda $\lambda = 1550\text{nm}$. Como se puede observar, PL13, PL32 y PL51 son modos de fuga.

10

Tabla 4:

Ej.4	Dneff (x10 ³)	Pérdidas de fuga (dB/m)	Aeff (μm ²)	CD (ps/nm-km)	Pérdidas por curvatura (dB/vuelta)	DMGD frente LP01
PL01	11,75	/	104	19,3	0,0	/
PL11	9,23	/	140	19,6	0,0	-22,5
PL21	6,72	/	188	20,6	0,0	-25,1
PL02	6,74	/	212	19,9	0,0	-20,1
PL12	4,24	/	227	20,3	0,0	-24,3
PL31	4,22	/	226	20,3	0,0	-16,7
PL03	1,76	/	311	20,4	12,0	-16,1
PL22	1,75	/	284	20,5	5,4	-17,8
PL 41	1,72	/	260	20,6	1,0	0,3
PL13	<0	137,1				
PL32	<0	47,4				
PL51	<0	1,6				
Ej. 5	Dneff (x10 ³)	Pérdidas de fuga (dB/m)	Aeff (μm ²)	CD (ps/nm-km)	Pérdidas por curvatura (dB/vuelta)	DMGD frente LP01
PL01	10,41	/	119	19,9	0,0	/
PL11	8,21	/	161	19,9	0,0	-18,5
PL21	6,03	/	215	20,2	0,0	-21,2
PL02	6,04	/	243	20,2	0,0	-16,6
PL12	3,87	/	260	20,4	0,0	-21,1
PL31	3,85	/	260	20,4	0,0	-15,4
PL03	1,71	/	357	20,6	9,8	-15,6
PL22	1,69	/	326	20,6	2,9	-17,1
PL41	1,67	/	298	20,7	0,7	-3,3
PL13	<0	31,2				
PL32	<0	11,4				
PL51	<0	0,5				

5 [0099] La tabla 5 proporciona las características de los modos PL de los ejemplos de la tabla 1 que soportan 12 modos guiados PL (ejemplos 6 y 7). PL04, PL23, PL42 y PL61 son modos de fuga.

Tabla 5:

Ej.6	Dneff (x10 ³)	Pérdidas de fuga (dB/m)	Aeff (μm ²)	CD (ps/nm-km)	Pérdidas por curvatura (dB/vuelta)	DMGD frente LP01
PL01	16,58	/	89	18,4	0,0	/
PL11	13,63	/	119	18,8	0,0	-53,2
PL21	10,69	/	160	19,1	0,0	-73,5
PL02	10,72	/	181	19,1	0,0	-60,9
PL12	7,80	/	193	19,5	0,0	-64,8
PL31	7,77	/	193	19,5	0,0	-70,6
PL03	4,90	/	266	19,8	0,0	-27,5
PL22	4,89	/	242	19,9	0,0	-30,5
PL 41	4,85	/	221	19,9	0,0	-45,3
PL13	2,00	/	260	19,0	5,8	-68,4
PL32	1,93	/	283	19,6	2,2	-31,3
PL51	1,94	/	247	20,2	0,2	-5,8
PL04	<0	218,5				
PL23	<0	149,9				
PL42	<0	31,9				
PL61	<0	0,6				
Ej. 7	Dneff (x10 ³)	Pérdidas de fuga (dB/m)	Aeff (μm ²)	CD (ps/nm-km)	Pérdidas por curvatura (dB/vuelta)	DMGD frente LP01
PL01	14,63	/	102	18,8	0,0	/
PL11	12,05	/	137	19,1	0,0	-48,2
PL21	9,49	/	184	19,5	0,0	-68,6
PL02	9,52	/	208	19,5	0,0	-56,5
PL12	6,97	/	222	19,9	0,0	-52,1
PL31	6,94	/	222	19,8	0,0	-66,4
PL03	4,44	/	304	20,1	0,0	18,1
PL22	4,43	/	278	20,2	0,0	-2,16
PL41	4,40	/	254	20,2	0,0	-37,0
PL13	1,90	/	298	17,4	77,5	-69,2
PL32	1,89	/	324	19,0	20,7	-3,7
PL51	1,86	/	283	20,3	2,8	6,7
PL04	<0	1077,0				
PL23	<0	750,12				
PL42	<0	145,0				
PL61	<0	3,0				

5 [0100] La tabla 6 proporciona las características de los modos PL de los ejemplos de la tabla 1 que soportan 16 modos guiados PL (ejemplos 8, 9 y 10). PL14, PL33, PL52 y PL71 son modos de fuga

Tabla 6:

ES 2 665 751 T3

Ej.8	Dneff (x10 ³)	Pérdidas de fuga (dB/m)	Aeff (µm ²)	CD (ps/nm-km)	Pérdidas por curvatura (dB/vuelta)	DMGD frente LP01
PL01	22,5	/	76	17,2	0,0	/
PL11	19,10	/	103	17,6	0,0	-88,8
PL21	15,72	/	139	18,1	0,0	-131,5
PL02	15,75	/	157	18,0	0,0	-112,3
PL12	12,39	/	168	18,5	0,0	-133,6
PL31	12,35	/	167	18,5	0,0	-142,9
PL03	9,06	/	230	18,5	0,0	-83,8
PL22	9,04	/	210	19,0	0,0	-104,8
PL41	8,99	/	192	19,0	0,0	-121,8
PL13	5,72	/	225	19,0	0,0	-34,2
PL32	5,69	/	245	19,3	0,0	-43,8
PL51	5,64	/	214	19,5	0,0	-67,9
PL04	2,39	/	301	19,6	0,0	-106,8
PL23	2,37	/	272	16,8	6,4	-80,2
PL42	2,34	/	276	17,5	2,2	-8,2
PL61	2,29	/	234	19,0	0,4	9,8
				19,9	0,0	
PL14	<0	271,8				
PL33	<0	125,1				
PL52	<0	11,8				
PL71	<0	0,2				
Ej. 9	Dneff (x10 ³)	Pérdidas de fuga (dB/m)	Aeff (µm ²)	CD (ps/nm-km)	Pérdidas por curvatura (dB/vuelta)	DMGD frente LP01
PL01	19,61	/	88	17,8	0,0	0
PL11	16,65	/	119	18,2	0,0	-73,7
PL21	13,70	/	159	18,5	0,0	-110,7
PL02	13,73	/	180	18,5	0,0	-94,6
PL12	10,80	/	192	18,9	0,0	-117,5
PL31	10,17	/	192	18,9	0,0	-124,1
PL03	7,89	/	264	19,4	0,0	-85,1
PL22	7,87	/	241	19,4	0,0	-102,0
PL41	7,84	/	220	19,4	0,0	-113,4
PL13	4,98	/	258	19,6	0,0	-59,7
PL32	4,95	/	281	19,7	0,0	-64,5
PL51	4,91	/	246	18,8	0,0	-78,1
PL04	2,07	/	345	18,1	6,5	-106,0
PL23	2,06	/	312	18,6	3,3	-91,4
PL42	2,03	/	317	19,5	0,9	-42,7
PL61	1,99	/	269	20,1	0,1	-26,8
PL14	<0	123,0				
PL33	<0	57,0				
PL52	<0	5,4				
PL71	<0	0,1				
Ej. 10	Dneff (x10 ³)	Pérdidas de fuga (dB/m)	Aeff (µm ²)	CD (ps/nm-km)	Pérdidas por curvatura (dB/vuelta)	DMGD frente LP01
PL01	16,58	/	102	18,5	0,0	/
PL11	14,03	/	138	18,8	0,0	-51,3
PL21	11,50	/	186	19,1	0,0	-82,6
PL02	11,52	/	210	19,1	0,0	-77,7
PL12	9,00	/	224	19,4	0,0	-90,4
PL31	8,97	/	224	19,4	0,0	-96,1
PL03	6,50	/	308	19,8	0,0	-67,2
PL22	6,49	/	281	19,8	0,0	-75,7
PL41	6,46	/	257	19,8	0,0	-89,8

PL13	4,00	/	301	20,2	0,0	-11,5
PL32	3,98	/	327	20,2	0,0	-29,6
PL51	3,94	/	286	20,2	0,0	-60,6
PL04	1,50	/	401	16,9	221,3	-82,0
PL23	1,49	/	364	17,9	73,4	-48,5
PL42	1,46	/	368	19,6	27,1	0,0
PL61	1,43	/	312	20,4	2,1	-12,3
PL14	<0	916,3				
PL33	<0	522,3				
PL52	<0	100,4				
LP71	<0	1,9				

5 **[0101]** La figura 5 ilustra la evolución de Max|DMGD| como una función de la longitud de onda para fibras de pocos modos que soportan de 6 a 16 modos guiados PL. Más precisamente, la figura 5 muestra el Max|DMGD| como una función de la longitud de onda para los ejemplos 2, 5, 6 y 9 enumerados en la tabla 1. Dichos ejemplos corresponden a fibras de pocos modos de acuerdo con la segunda realización de la invención, como se representa en la figura 2B.

10 **[0102]** El eje x representa la longitud de onda de la luz guiada por la fibra, que varía de 1530 a 1570 nm. El eje y representa el Max|DMGD| entre cualesquiera dos modos guiados PL, expresado como ps/km y que van de 0 a 200. La curva 51 corresponde a la FMF que guía 6 modos PL del ejemplo 2; la curva 52 corresponde a los modos 9 PL guiados de la FMF del ejemplo 5; la curva 53 corresponde a los 12 modos PL guiados de la FMF del ejemplo 6, mientras que la curva 54 corresponde a los 16 modos PL guiados de la FMF del ejemplo 9.

15 **[0103]** Como se puede ver, el Max|DMGD| permanece bajo en toda la banda C extendida desde 1530 hasta 1570 nm. La pendiente del Max|DMGD| en esta banda C extendida tiene un valor absoluto < 3 ps/km /nm, preferiblemente < 2 ps/km/nm, y más preferiblemente < 1 ps/km /nm.

20 **[0104]** La figura 6 representa la evolución de Max|DMGD| para las FMF que soportan de 6 a 16 modos guiados PL en función del parámetro α del perfil de índice gradual. Más precisamente, la figura 6 muestra el Max|DMGD| como una función de α para los ejemplos 2, 4, 7 y 8 enumerados en la tabla 1. Dichos ejemplos corresponden a fibras de pocos modos de acuerdo con la segunda realización de la invención, como se representa en la figura 2B.

25 **[0105]** El eje x representa el valor de α , que es un parámetro adimensional que define la forma del perfil de índice del núcleo óptico de índice gradual, con α que varía de 1,91 a 1,99. El eje y representa el Max|DMGD| entre cualesquiera de dos modos guiados PL, expresados como ps/km y que van de 0 a 200. La curva 61 corresponde a la FMF que guía 6 modos PL del ejemplo 2; la curva 62 corresponde a los 9 modos guiados PL de la FMF del ejemplo 4; la curva 63 corresponde a los 12 modos guiados PL de la FMF del ejemplo 7, mientras que la curva 64 corresponde a los 16 modos guiados PL de la FMF del ejemplo 8.

30 **[0106]** Como se muestra en la figura 6, hay valores óptimos para α , para los cuales estos Max|DMGD| tienen valores mínimos α más bajo y más alto que estos " α óptimos" generalmente exhiben DMGD con signos opuestos.

35 **[0107]** Seleccionando cuidadosamente el valor de α , lo más cercano posible al óptimo, es posible diseñar una fibra de pocos modos minimizando el valor Max|DMGD| . Las pocas fibras ópticas 10 de modo según la descripción tienen una baja pérdida y un pequeño retardo de grupo diferencial, y son adecuadas para su uso en sistemas de transmisión óptica, particularmente aquellos que utilizan multiplexado por división espacial y que están configurados para transmisión de larga distancia.

40 **[0108]** La figura 7 ilustra un enlace óptico 70 de acuerdo con una realización de la invención. Tal enlace óptico comprende p extensiones de fibras ópticas, con $p \geq 2$, que se empalman entre sí. La figura 7 solo muestra la fibra óptica 701 y la fibra óptica 70p, todas las restantes fibras ópticas potenciales en el enlace óptico están simbolizadas por líneas discontinuas. Al menos una de las fibras ópticas en el enlace óptico 70 es tal que comprende las características de una realización descrita anteriormente. En otras palabras, al menos una de las fibras ópticas tiene un núcleo con un único perfil de índice gradual y un radio $R1 \geq 13,5 \mu\text{m}$, y un revestimiento con una ranura deprimida, y es tal que cumple el criterio $C \leq 18$. Sin embargo, el enlace óptico 70 también puede ser tal que varias o todas las fibras ópticas que comprende cumplan con una realización de la invención. El enlace de fibra óptica 70 tiene una longitud de L km, que puede ser de varias decenas o varios cientos de kilómetros. En un ejemplo, hay al menos dos tramos de fibra 701 y 702. En otro ejemplo, hay al menos cinco tramos de fibras 701 a 705. En otro ejemplo más, hay al menos diez tramos de fibra 701 a 7010.

45 **[0109]** Las figuras 8A y 8B ilustran realizaciones de un sistema óptico de acuerdo con la invención.

50 **[0110]** De acuerdo con la primera realización en la figura 8A, dicho sistema óptico comprende transceptores 81 y receptores 85 ópticamente conectados por un enlace de fibra óptica 70 que incluye, al menos, un tramo de fibra. Los transceptores 81 comprenden fuentes de luz (tales como láseres) y generan n modos PL, referenciados con 1, 2, ..., n usados en el sistema óptico de la figura 8A. Un multiplexor de modo 82, multiplexa los n modos PL y está ópticamente conectado al enlace óptico 70, que guía los n modos PL multiplexados, hacia un demultiplexor de modo 83, que está conectado ópticamente al extremo del enlace óptico 70.

[0111] El demultiplexor de modo 83 demultiplexa los n modos PL multiplexados, y alimenta cada modo PL a un amplificador 84. En la salida de los amplificadores 84, los modos PL entran en los receptores 85.

[0112] Un sistema óptico de este tipo 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 más, $M = 10$. En el caso de que el

sistema óptico comprenda M enlaces ópticos o tramos, también comprende multiplexores de modo M 82, demultiplexores de modo M 83, y amplificadores M 84 para cada modo PL guiado por el sistema óptico.

5 **[0113]** La realización de la figura 8B difiere de la primera realización en la figura 8A en que el amplificador 84 amplifica todos los modos PL guiados por la fibra óptica 70; como tal, el amplificador 84 está conectado ópticamente entre la salida del enlace óptico 70 y la entrada del demultiplexor de modo 83. En esta segunda realización, cuando el sistema óptico comprende M enlaces ópticos o tramos, también comprende amplificadores M 84; sin embargo, solo hay un multiplexor de modo 82, ópticamente conectado entre los transceptores 81 y un enlace óptico 70, y solo un demultiplexor de modo 83, ópticamente conectado entre el amplificador 84 y los receptores 85.

10 **[0114]** Las realizaciones de las figuras 8A y 8B se dan como meros ejemplos, y una fibra óptica de acuerdo con la invención puede, por supuesto, usarse en cualquier otro tipo de sistema óptico.

REIVINDICACIONES

1. Fibra óptica que comprende un núcleo óptico y un revestimiento óptico que rodea el núcleo óptico, teniendo el núcleo óptico un único perfil de índice gradual con $\alpha \geq 1$, siendo α es un parámetro adimensional que define la forma del perfil de índice del núcleo óptico y teniendo el núcleo óptico un radio R_1 y un índice de refracción máximo n_0 , donde dicho revestimiento óptico en su borde exterior un índice de refracción n_{Cl} , donde dicho revestimiento óptico comprende una región de n_{trench} de índice de refracción deprimido, denominada zanja, que rodea el núcleo óptico, teniendo dicha zanja un radio interior R_2 , con $R_2 \geq R_1$, y un radio exterior R_3 , con $R_3 > R_2$, estando caracterizada dicha fibra óptica porque dicho radio del núcleo óptico R_1 , expresado en micrómetros, satisface un criterio C de calidad de comunicaciones ópticas definido por la siguiente ecuación:

$$C = 10 \cdot \frac{Max|DMGDs|}{(R_1^2 \cdot Dn_1)^3}$$

donde DMGD es el Retardo de Grupo de Modo Diferencial entre dos modos guiados en dicha fibra óptica, donde $Max|DMGDs|$ es el valor máximo absoluto de DMGD entre cualquier combinación de modos guiados, expresada en ps/km, y donde $Dn_1 = n_0 - n_{Cl}$ es la diferencia del índice de revestimiento del núcleo para $\lambda = \lambda_c$, donde λ_c es la longitud de onda de transmisión central de una banda de funcionamiento a la que se destina dicha fibra óptica, porque en que dicho valor α de dicho perfil de índice gradual y siendo elegido el radio del núcleo óptico R_1 de manera que $R_1 \geq 13,5 \mu m$ y $C \leq 18$, y porque dicha fibra óptica guía al menos 4 modos PL.

2. Fibra óptica según la reivindicación 1, en la que dicho radio del núcleo óptico R_1 es tal que $R_1 \leq 20 \mu m$.

3. Fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones 1 y 2, en la que dicha zanja tiene parámetros que satisfacen la siguiente relación:

$$55 \leq 1000 \cdot |(R_3 - R_2) \cdot Dn_3 \cdot (R_1^2 \cdot Dn_1)| \leq 150$$

donde $Dn_3 = n_{trench} - n_{Cl}$ es la diferencia de índice de revestimiento de zanja para $\lambda = \lambda_c$, y donde los radios R_1 , R_2 y R_3 se expresan en micrómetros.

4. Fibra óptica según la reivindicación 3, en la que $Dn_3 \leq -3 \cdot 10^{-3}$.

5. Fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones 1 y 2, en la que se guían de 4 a 16 modos PL.

6. Fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en la que se guían al menos 6 modos PL, y preferiblemente de 6 a 16 modos PL.

7. Fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en la que dicho núcleo óptico tiene un índice de refracción $n_1 = n_{Cl}$ mínimo, y en el que dicho revestimiento óptico también comprende una capa de revestimiento interior que rodea directamente dicho núcleo óptico, con un radio interior R_1 y un radio exterior $R_2 \geq R_1$, teniendo dicha capa de revestimiento interior un índice de refracción n_2 constante, de modo que $n_2 \neq n_{Cl}$ y $n_2 > n_{trench}$.

8. Fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en la que dicho núcleo óptico tiene un índice de refracción mínimo $n_1 \neq n_{Cl}$, y en el que dicho revestimiento óptico también comprende una capa de revestimiento interior que rodea directamente dicho núcleo óptico, con un radio interior R_1 y un radio exterior $R_2 \geq R_1$, teniendo dicha capa de revestimiento interior un índice de refracción constante n_2 , tal que $n_2 = n_1$ y $n_2 > n_{trench}$.

9. Fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en la que dicho núcleo óptico tiene un índice de refracción mínimo que es igual a n_{Cl} , y en el que dicho revestimiento óptico también comprende una capa de revestimiento interior que rodea directamente dicho núcleo óptico, con un radio interno R_1 y un radio exterior $R_2 \geq R_1$, siendo dicha capa de revestimiento interior una extensión de dicho perfil α de índice gradual único de dicho núcleo óptico, y en el que dicha capa interna tiene un índice de refracción $n_1 = n_{trench}$ mínimo.

10. Fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones 1, 2, 5 y 7 a 9, en la que se soportan cuatro modos guiados PL, y en la que $Max |DMGDs| < 20$ ps/km y preferiblemente $Max |DMGDs| < 10$ ps/km para $\lambda = \lambda_c$, y en donde $Max|DMGDs| < 30$ ps/km y preferiblemente $Max|DMGDs| < 20$ 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 a la cual se destina dicha fibra óptica y donde $2\delta\lambda$ es un ancho de dicha banda de funcionamiento.

- 5 11. Fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, en la que admite seis modos guiados PL, y en la que $\text{Max}|\text{DMGDs}| < 25 \text{ ps/km}$ y de preferencia $\text{Max}|\text{DMGDs}| < 15 \text{ ps/km}$ para $\lambda = \lambda_c$, y en el que $\text{Max}|\text{DMGDs}| < 50 \text{ ps/km}$ y de preferencia $\text{Max}|\text{DMGDs}| < 30 \text{ ps/km}$ 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 a la cual se destina dicha fibra óptica y donde $2\delta\lambda$ es un ancho de dicha banda de funcionamiento.
- 10 12. Fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, en la que se soportan nueve modos guiados PL, y en la que $\text{Max}|\text{DMGDs}| < 100 \text{ ps/km}$ y preferiblemente $\text{Max}|\text{DMGDs}| < 60 \text{ ps/km}$ para $\lambda = \lambda_c$, y en donde $\text{Max}|\text{DMGDs}| < 200 \text{ ps/km}$ y preferiblemente $\text{Max}|\text{DMGDs}| < 120 \text{ ps/km}$ 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 a la cual se destina dicha fibra óptica y donde $2\delta\lambda$ es un ancho de dicha banda de funcionamiento.
- 15 13. Fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, en la que admite doce modos guiados PL, y en la que $\text{Max}|\text{DMGDs}| < 150 \text{ ps/km}$ y preferiblemente $\text{Max}|\text{DMGDs}| < 120 \text{ ps/km}$ para $\lambda = \lambda_c$, y en donde $\text{Max}|\text{DMGDs}| < 300 \text{ ps/km}$ y preferiblemente $\text{Max}|\text{DMGDs}| < 250 \text{ ps/km}$ 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 a la cual se destina dicha fibra óptica y donde $2\delta\lambda$ es un ancho de dicha banda de funcionamiento.
- 20 14. Fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, en la que se soportan dieciséis modos guiados PL, y en la que $\text{Max}|\text{DMGDs}| < 300 \text{ ps/km}$ y preferiblemente $\text{Max}|\text{DMGDs}| < 250 \text{ ps/km}$ para $\lambda = \lambda_c$, y en donde $\text{Max}|\text{DMGDs}| < 600 \text{ ps/km}$ y preferiblemente $\text{Max}|\text{DMGDs}| < 500 \text{ ps/km}$ 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 a la cual se destina dicha fibra óptica y donde $2\delta\lambda$ es un ancho de dicha banda de funcionamiento.
- 25 15. Fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones 10 a 14, en la que $\lambda_c = 1550 \text{ nm}$ y $\delta\lambda = 20 \text{ nm}$.
- 30 16. Fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que los modos PL guiados por dicha fibra óptica tienen áreas efectivas, $A_{\text{eff}} < 400 \mu\text{m}^2$, preferiblemente $A_{\text{eff}} < 350 \mu\text{m}^2$, y pérdidas por curvatura $< 100 \text{ dB/vuelta}$, preferiblemente $< 50 \text{ dB/vuelta}$, en curva de 10 mm de radio a 1550 nm, y en donde los modos de fuga de PL tienen pérdidas de fuga $> 0,1 \text{ dB/m}$, preferiblemente $> 0,5 \text{ dB/m}$, para $\lambda = \lambda_c$.
- 35 17. Enlace óptico que comprende al menos una fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 16.
18. Sistema óptico que comprende al menos una fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 16.

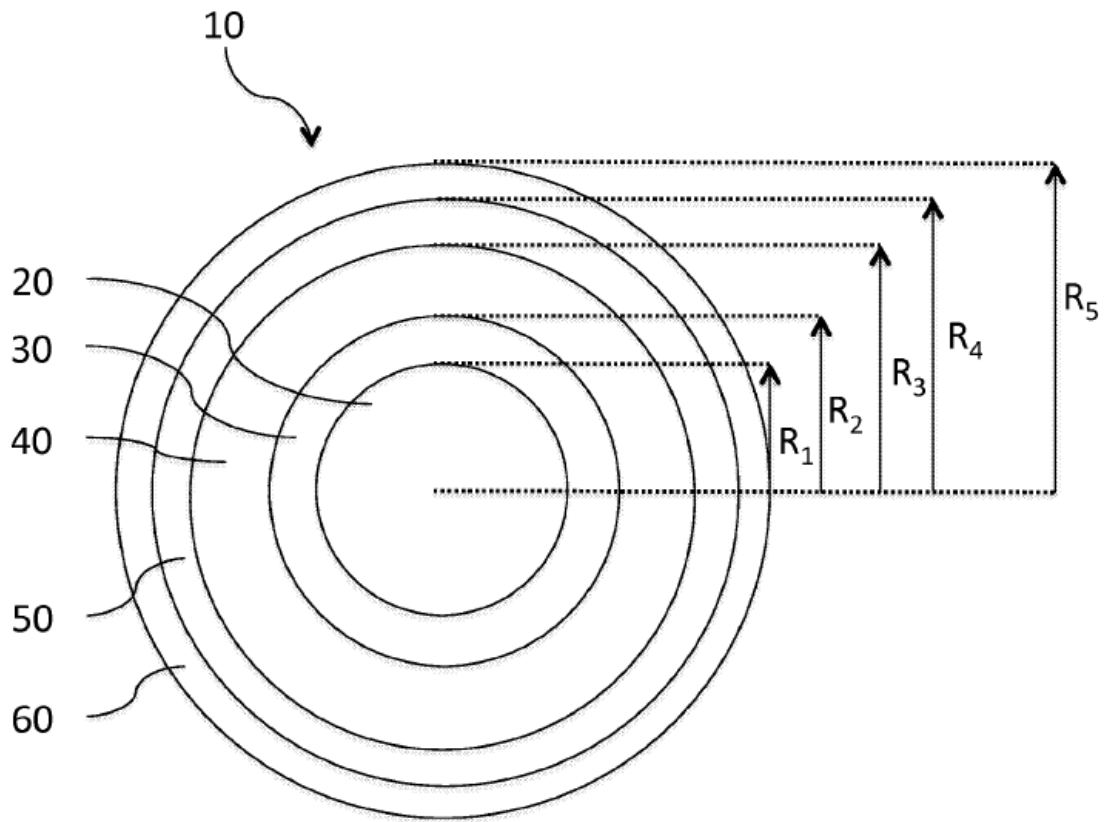


Figura 1

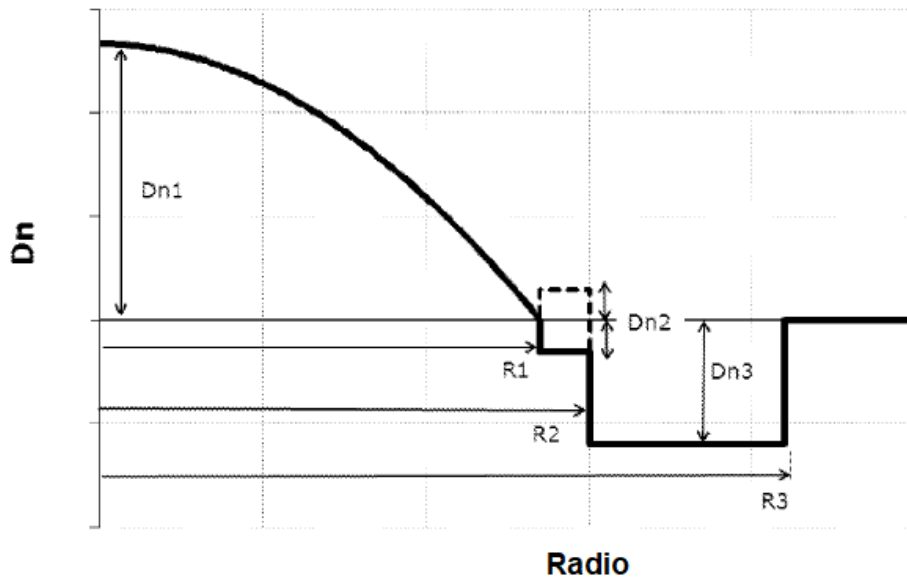


Fig. 2A

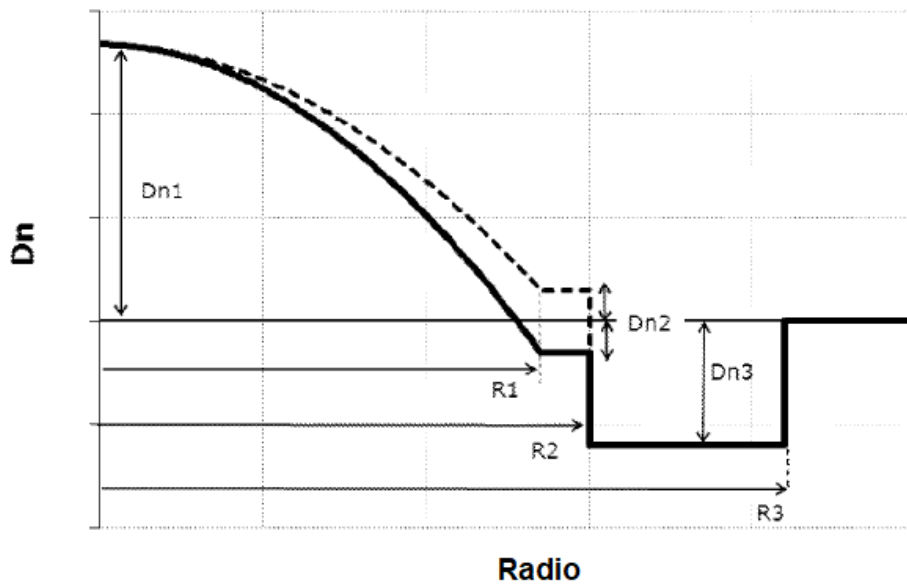


Fig. 2B

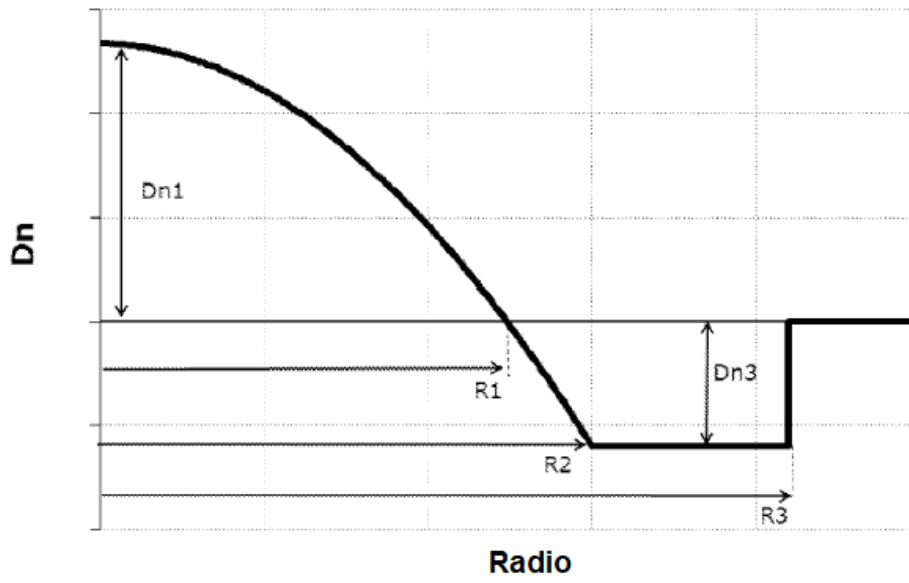


Fig. 2C

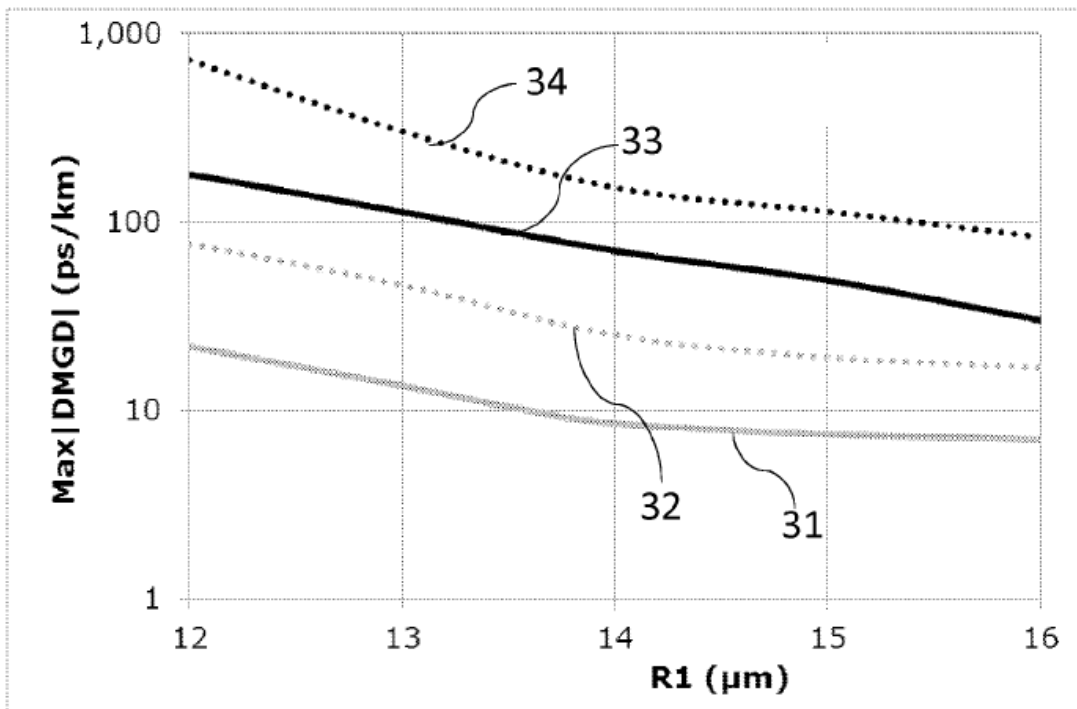


Fig. 3

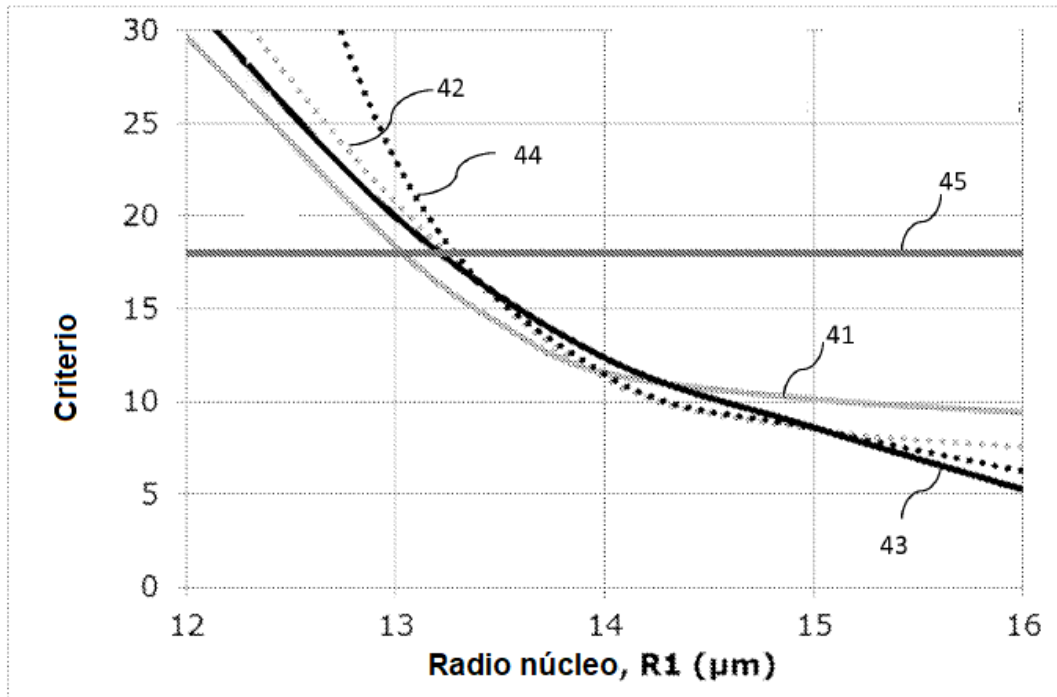


Fig. 4

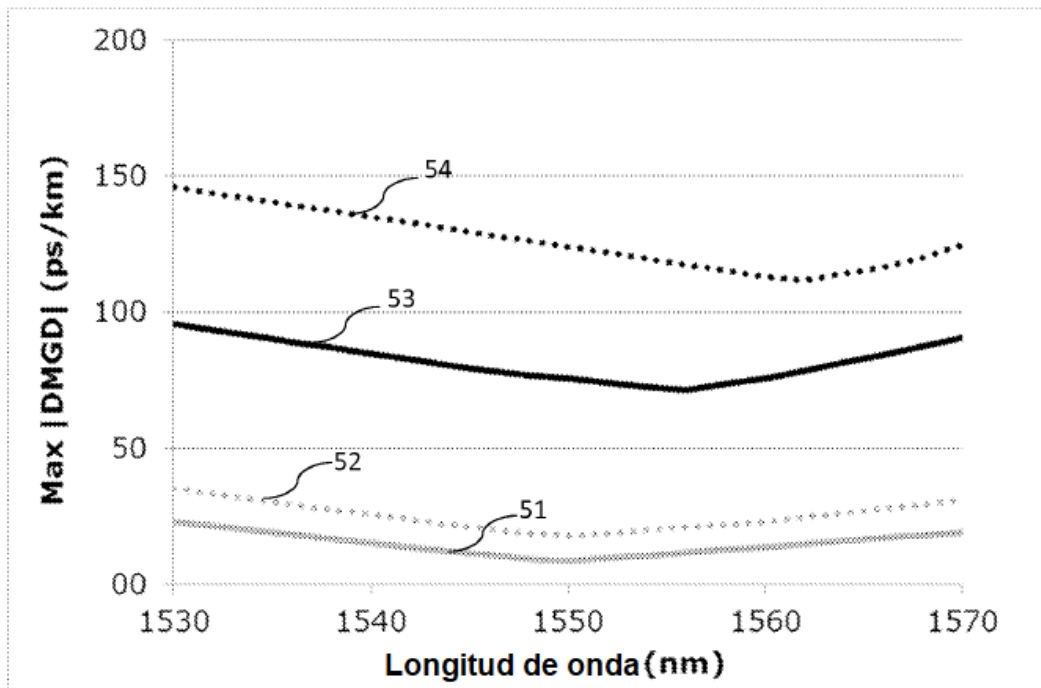


Fig. 5

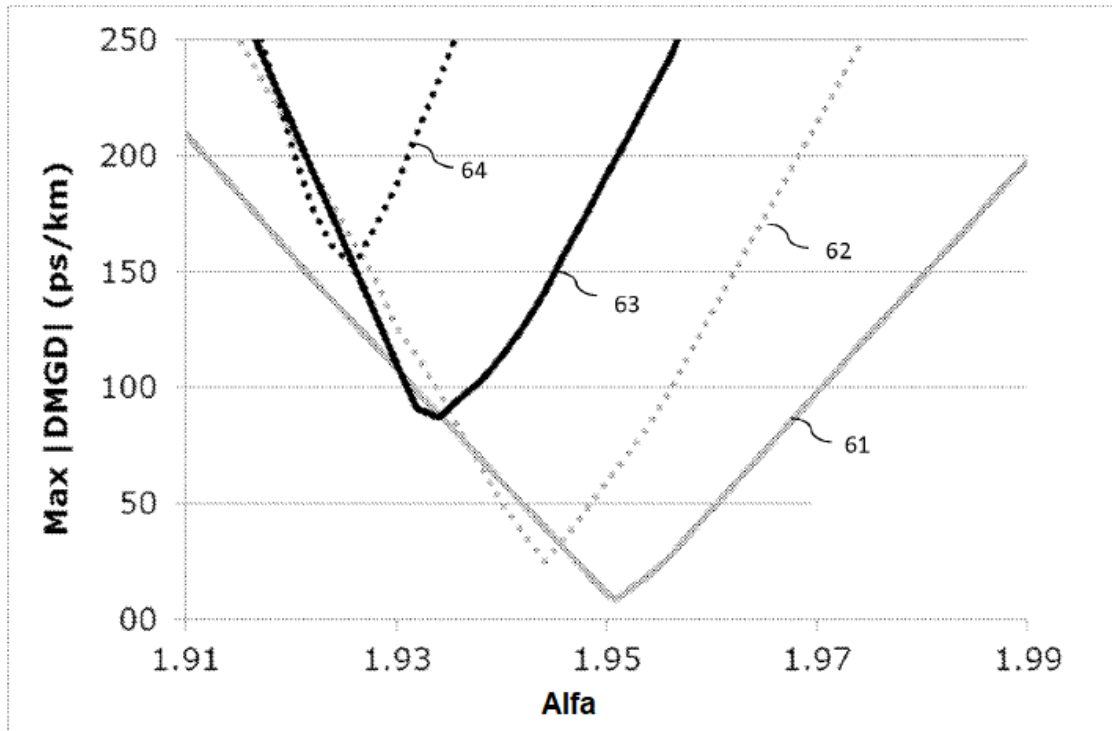


Fig. 6

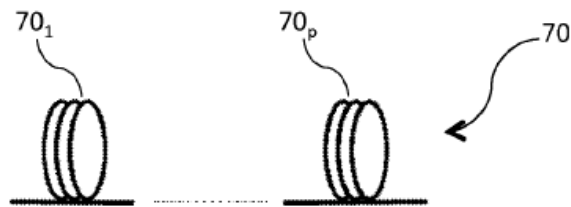


Figura 7

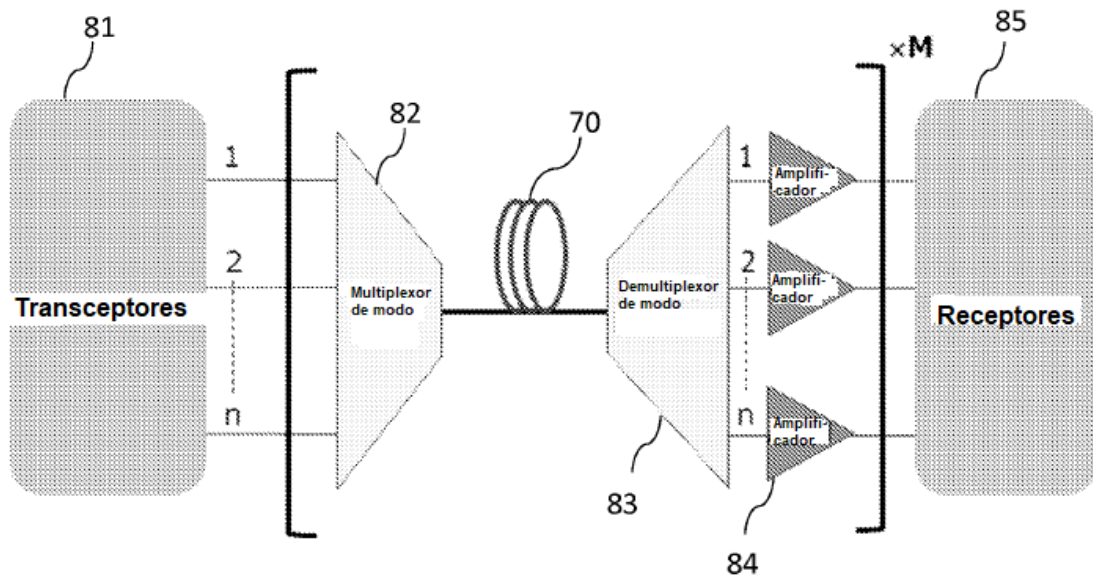


Fig. 8A

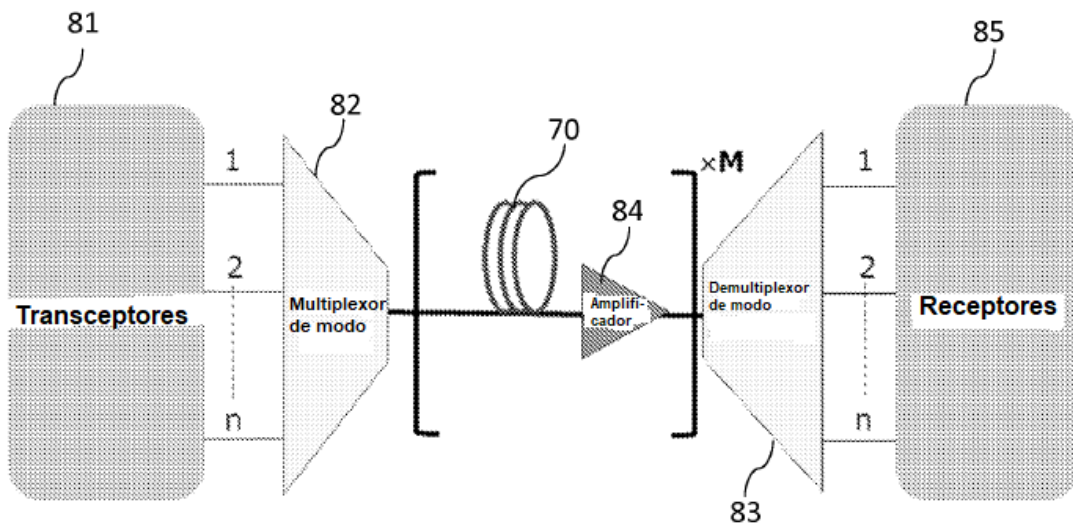


Fig. 8B

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

- WO 2011094400 PCT [0007]
- US 20130071114 A [0011] [0013] [0026]
- US 2013007115 A [0013]
- WO 2013126254 A [0014]
- WO 2012161809 PCT [0016]
- US 20120328255 A [0017] [0026]
- US 20130071115 A [0026]

10