

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 667 796**

51 Int. Cl.:

G02B 6/02 (2006.01)

H04J 14/04 (2006.01)

G02B 6/028 (2006.01)

G02B 6/036 (2006.01)

H04J 14/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **20.09.2013 PCT/IB2013/002413**

87 Fecha y número de publicación internacional: **26.03.2015 WO15040447**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **20.09.2013 E 13831834 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **31.01.2018 EP 3047317**

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:
14.05.2018

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 2 667 796 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 INVENCION

[0001] La invención se refiere al campo de la transmisión por fibra óptica, y, más específicamente a mejorar enlaces de fibra óptica de pocos modos para multiplexado por división de espacio.

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 mostrándose en el eje y la diferencia Dn entre el índice de refracción en el radio r , $n(r)$ y el índice de refracción del revestimiento óptico n_{cl} .

[0003] Actualmente, existen dos categorías principales de fibras ópticas: fibras de modos múltiples y fibras de modo único. En una fibra de modos múltiples, para una longitud de onda dada, varios modos ópticos se propagan simultáneamente a lo largo de la fibra óptica, mientras que en una fibra de modo único, los modos de orden superior (denominados en lo sucesivo HOM) son cortados o altamente atenuados.

[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.

[0005] Las fibras de modos múltiples 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 de modos múltiples típicamente tiene un diámetro de 50 μm o 62,5 μm . Las fibras de modos múltiples 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 llamado 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. Sin embargo, desafortunadamente tales diseños de fibra mejoran el acoplamiento modal, lo que impide la utilización de fibras de modos múltiples en el escenario de comunicaciones de larga distancia.

[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 el 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.

[0007] Una técnica de este tipo ha requerido el desarrollo de nuevos tipos de fibras ópticas, llamadas fibras ópticas pocos modos, que soportan más de un modo espacial pero menos modos espaciales que las fibras de modos múltiples. Tales fibras de pocos modos 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 se producen en las fibras de modos múltiples.

[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 a utilizar.

[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 el 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.

[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.

[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 Δ_{1MAX} de aproximadamente el 0,3% a aproximadamente el 0,6% respecto del revestimiento. La fibra óptica también tiene un área efectiva 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 Δ_{4MAX} tal que $\Delta_{1MAX} > \Delta_{4MAX}$, y el retardo de grupo de modo diferencial entre los modos PL01 y PL11 es menor de aproximadamente 0,5 ns/km a una longitud de onda de 1550 nm.

[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.

[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, en US 2013/007114 se divulga, esta segunda solución conocida también consiste en una FMF que admite solo dos modos guiados.

[0014] Otros diseños conocidos han llevado a FMF que guían hasta 4 o incluso 6 modos.

[0015] 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 no deseados. 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 manera 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 de fuga con el índice efectivo más alto es suficientemente grande para evitar sustancialmente el acoplamiento entre ellos. Las FMF que admiten hasta 4 modos se muestran en ejemplos.

[0016] El documento de patente US 2012/0328255 divulga fibras ópticas de pocos modos que incluyen un núcleo de vidrio y un revestimiento de vidrio rodeándolo y en contacto directo con el núcleo de vidrio. El núcleo de vidrio puede incluir un radio R_1 desde aproximadamente $8 \mu\text{m}$ hasta 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 Δ_{1MAX} 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 x modos PL a una longitud de onda de 1550 nm, donde x es un número entero mayor que 1 y menor de 10. El revestimiento de vidrio puede incluir un índice de refracción relativo máximo Δ_{4MAX} tal que $\Delta_{1MAX} > \Delta_{4MAX}$. Las FMF que soportan hasta 6 modos se muestran en ejemplos.

[0017] Aunque tales diseños son prometedores, no permiten reducir los retardos de modo diferencial tanto como se desea, 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 de fuga, 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 fuga.

[0018] Además, todas estas técnicas conocidas apuntan a proporcionar nuevos diseños mejorados para fibras de pocos modos, y se basan en criterios teóricos, que deben cumplir las fibras. Sin embargo, estos diseños pueden ser sensibles a pequeñas variaciones que pueden ocurrir durante el proceso de fabricación, como variaciones de perfil, variaciones de radio o variaciones de diferencia de índice de refracción, por ejemplo. De hecho, es muy difícil fabricar fibras ópticas repetidas veces, lo que muestra perfectamente las características teóricas a las que se apuntaba.

[0019] A principios de los años 80, se propuso una técnica para fibras de modos múltiples consistente en asociar varias fibras ópticas para formar un enlace óptico, donde el enlace óptico mostraba un rendimiento mejorado en comparación con las fibras ópticas individuales, gracias a un fenómeno de compensación de las imperfecciones de las fibras. El documento de patente WO 2013/126254 transpone esta técnica a enlaces de fibra de pocos modos, mediante la concatenación de 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 de la DMGD entre los modos PL01 y PL11 sobre el enlace de fibra óptica. Sin embargo, el número de modos guiados PL para tales enlaces ópticos se limita a 2 o 3.

[0020] De acuerdo con ello, existe una necesidad de diseños para fibras ópticas de pocos modos que guíen 4 o más modos PL, con pequeños retardos de grupo de modo diferencial, bajas pérdidas por curvatura y altas pérdidas de fuga.

3. SUMARIO DE LA INVENCION

[0021] En una realización particular de la invención, se propone un enlace óptico, que comprende N fibras ópticas, con $N \geq 2$, siendo N un número entero. Cada fibra óptica comprende un núcleo óptico y un revestimiento óptico que rodea el núcleo óptico, teniendo el núcleo óptico un perfil de índice gradual a_i sencillo con $a_i \geq 1$, siendo a_i es un parámetro adimensional que define la forma del perfil de índice del núcleo óptico, y teniendo el núcleo óptico un radio R_{1i} y un índice de refracción máximo n_{0i} , donde $i \in [1; N]$ es un índice que designa dicha fibra óptica. Dicho revestimiento óptico tiene en su borde exterior un índice de refracción n_{Cii} , y comprende una región de índice de refracción deprimido $n_{trenchi}$, denominada zanja, que rodea el núcleo óptico, teniendo dicha zanja un radio interior R_{2i} , con $R_{2i} \geq R_{1i}$, y un radio exterior R_{3i} , con $R_{3i} > R_{2i}$.

[0022] Dicho enlace óptico es tal que un radio del núcleo óptico medio R_1 de enlace para dicho enlace óptico satisface un criterio C de calidad de comunicaciones ópticas definidas por la siguiente ecuación:

$$C = 10 \cdot \frac{\text{Max}|DMGD_{link}|}{(R_{1link}^2 \cdot Dn_{1link})^3}$$

donde DMGD_{link} es el retardo de grupo del modo diferencial entre dos modos guiados en dicho enlace óptico, donde Max|DMGD_{link}| es el valor máximo absoluto de DMGD entre cualquier combinación de modos guiados en el

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

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

con Dn_{1i} = n_{0i} - n_{Ci} como la diferencia del índice núcleo-revestimiento para la fibra óptica i, en λ = λc, donde λc es una longitud de onda de transmisión central de una banda operativa a la que se destina dicha fibra óptica, y es tal que, para al menos una fibra óptica i de dicho enlace, dicho radio del núcleo óptico R_{1i} se elige de modo que R_{1i} ≥ 13,5 μm y para todas las fibras ópticas i ∈ [[1; N]] de dicho enlace, eligiéndose dicha longitud L_i de manera que C ≤ 18.

[0023] Como se usa en el presente documento, y salvo que se especifique lo contrario, el término "perfil de índice gradual ai sencillo" se refiere a un núcleo óptico que tiene un perfil de índice de refracción n(r) definido de la siguiente manera:

$$n(r) = n_{0i} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot \Delta \cdot \left(\frac{r}{R_{1i}}\right)^{\alpha_i}} \quad r \leq R_{1i}$$

dónde:

r es una variable representativa del radio de la fibra óptica, R_{1i} es el radio del núcleo óptico, Δ es la diferencia de

$$\Delta = \frac{n_{0i}^2 - n_{1i}^2}{2n_{0i}^2}$$

índice de refracción normalizada con

n_{1i} es el índice de refracción mínimo del núcleo óptico,

n_{0i} es el índice de refracción máximo del núcleo óptico,

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

Un parámetro alfa α = 2 corresponde a una parábola invertida. Un parámetro alfa α = 1 corresponde a una forma triangular, mientras que un parámetro alfa α = ∞ corresponde a una función escalonada.

[0024] La graduación del índice se puede adaptar para reducir el desajuste de la velocidad de grupo entre los modos guiados por el núcleo de baja pérdida.

[0025] Seleccionando adecuadamente las respectivas longitudes L_i de todas las fibras ópticas que constituyen el enlace óptico, es posible construir un enlace de fibras óptica de pocos modos, que permita guiar un mayor número de modos PL en comparación con FMF de la técnica anterior, mientras se alcanza el retardo de grupo de modo diferencial más bajo. Tal enlace óptico es por lo tanto un enlace de FMF compensado en DMGD y puede mostrar propiedades mejoradas respecto de las FMF individuales comprendidas en dicho enlace óptico. Tal DMGD bajo permite que todos los modos se detecten simultáneamente usando técnicas MIMO ("Salida de múltiples entradas múltiples") 2Nx2N (N es el número total de modos espaciales, es decir, que incluye degeneraciones de modo PL), independientemente de los fenómenos de acoplamiento de modo. De este modo, el alcance del sistema se aumenta con respecto a la técnica anterior.

[0026] Se debe observar, sin embargo, que también podrían usarse técnicas de MIMO menos complejas para detectar grupos de modos que muestran diferencias de índice efectivas cercanas, en lugar de detectar todos los modos individualmente.

[0027] Con un radio de núcleo R_{1i} ≥ 13,5 μm es permitido guiar un mayor número de modos, en comparación con las técnicas de la técnica anterior, tales como las descritas en los documentos de patente de los documentos US 2012/0328255, US 2013/0071114 y US 2013/0071115.

[0028] Además, una fibra óptica asistida por zanja deprimida conduce a disminuir las pérdidas de macro-curvatura mejorando el confinamiento de los modos ópticos dentro del núcleo. Por lo tanto, la adición de una zanja en el revestimiento de las fibras de pocos modos de tal enlace óptico, que cumpla los criterios R_{1i} ≥ 13,5 μm y C < 18, permite mejorar significativamente la compensación entre DMGD y las pérdidas por curvatura, tal zanja es una forma bien conocida de reducir la sensibilidad a curvatura.

[0029] De acuerdo con una característica ventajosa, al menos una de las fibras ópticas comprendidas en dicho enlace óptico tiene parámetros de zanja que satisfacen la siguiente relación:

$$55 \leq 1000 \cdot |(R_{3i} - R_{2i}) \cdot Dn_{3i} \cdot (R_{1i}^2 \cdot Dn_{1i})| \leq 150$$

donde Dn_{3i} = n_{trenchi} - n_{Ci} es la diferencia de índice revestimiento-zanja en λ = λc. Preferiblemente, Dn₃ ≤ -3.10⁻³.

[0030] Una zanja que tiene tales características proporciona una fibra de pocos modos que muestra una buena compensación entre pérdidas por curvatura y pérdidas de fuga, lo que ayuda a mejorar las propiedades del enlace óptico al que pertenece. Un enlace de fibras de pocos modos según la invención soporta un número aumentado de modos PL en comparación con las FMF de la técnica anterior, asegurando bajos DMGD, y mostrando bajas pérdidas por curvatura (<100dB/vuelta para radio de curvatura de 10 mm a 1550nm) para todos los modos guiados, para que puedan propagarse de forma robusta y altas pérdidas de fuga (> 0,1dB/m a 1550nm) para todos los modos de fuga, de modo que puedan cortarse y/o atenuarse después de algunas decenas de metros.

[0031] En una realización de la invención, varias o todas las fibras ópticas del enlace óptico tienen una zanja que satisface dicho criterio de zanja.

[0032] En otra realización, al menos una de dichas fibras ópticas tiene un radio de núcleo óptico R_i y un valor α_L de dicho perfil de índice gradual de manera que:

$$C = 10 \cdot \frac{\text{Max}|DMGD_i|}{(R_{1i}^2 \cdot Dn_{1i})^3} \leq 18$$

donde DMGD_i es el retardo de grupo de modo diferencial entre dos modos guiados en dicha fibra óptica, donde Max |DMGD_i| es el valor máximo absoluto de DMGD entre cualquier combinación de modos guiados en dicha fibra óptica,

y donde $Dn_{1i} = n_{0i} - n_{Cii}$ es la diferencia del índice revestimiento-núcleo para $\lambda = 1550\text{nm}$ para dicha fibra óptica. Preferiblemente, dicha fibra óptica es tal que $R_{1i} \leq 20\mu\text{m}$.

[0033] Por lo tanto, puede haber una, dos o incluso todas las fibras ópticas en dicho enlace óptico, cuyo núcleo cumple individualmente con el criterio $C \leq 18$ establecido por los inventores. Esto permite diseñar enlaces compensados en DMGD con DMGD muy bajos, cerca del valor teórico mínimo. También es posible que varias o todas las fibras ópticas de dicho enlace satisfagan tanto el criterio central $C \leq 18$ como el criterio de zanja

$$55 \leq 1000 \cdot |(R_{3i} - R_{2i}) \cdot Dn_{3i} \cdot (R_{1i}^2 \cdot Dn_{1i})| \leq 150.$$

[0034] De acuerdo con una realización de la invención, tal enlace óptico guía al menos 4 modos PL, y preferiblemente de 4 a 16 modos PL.

[0035] De acuerdo con otra realización de la invención, dicho enlace óptico guía, al menos, 6 modos PL, y preferiblemente de 6 a 16 modos PL.

[0036] Un número tan elevado de modos guiados permite aumentar la capacidad de un sistema óptico que comprenda dicho enlace de fibra óptica de pocos modos, y responde a la demanda de mayor ancho de banda en sistemas de transmisión óptica de larga distancia.

[0037] Un enlace 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 eficaz en transmisiones multiplexadas por división espacial, en comparación con las FMF de la técnica anterior.

[0038] De acuerdo con una característica ventajosa de la invención, para todas las fibras ópticas $i \in \{[1; N]\}$ de dicho enlace, dichas longitudes L_i se eligen para minimizar Max |DMGD_{link}| de dicho enlace.

[0039] De este modo, es posible alcanzar un valor de DMGD muy bajo, lo más cercano posible al valor teórico mínimo.

[0040] Según otro aspecto, al menos dos fibras ópticas de dicho enlace tienen DMGD_i que muestran 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 modo guiado en fibra óptica i .

[0041] De este modo, es posible conseguir realmente una buena compensación en DMGD concatenando las fibras de longitudes apropiadas, y de este modo construir un enlace óptico que muestre un DMGD menor que todas y cada una de las fibras ópticas de dicho enlace.

[0042] De acuerdo con una primera realización, para, al menos, una de dichas fibras $i \in \{[1; N]\}$ de dicho enlace óptico, dicho núcleo óptico tiene un índice de refracción mínimo $n_{1i} = n_{Cii}$, y dicho revestimiento óptico también comprende una capa de revestimiento interior que rodea directamente dicho núcleo óptico, con un radio interior R_{1i} y un radio exterior $R_{2i} \geq R_{1i}$, teniendo dicha capa interior de revestimiento un índice de refracción constante n_{2i} , tal que $n_{2i} \neq n_{Cii}$ y $n_{2i} > n_{\text{trench}i}$.

[0043] Dicho perfil 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 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.

[0044] De acuerdo con una segunda realización, para, al menos, una de dichas fibras $i \in \{[1; N]\}$ de dicho enlace óptico, dicho núcleo óptico tiene un índice de refracción mínimo $n_{1i} \neq n_{Cii}$, y dicho revestimiento óptico también comprende una capa de revestimiento interior que rodea directamente dicho núcleo óptico, con un radio interno R_{1i} y un radio exterior $R_{2i} \geq R_{1i}$, teniendo dicha capa de revestimiento interna un índice de refracción constante n_{2i} , tal que $n_{2i} = n_{1i}$ y $n_{2i} > n_{\text{trench}i}$.

[0045] Dicho perfil de índice gradual asistido por zanja alternativo permite cumplir el criterio de núcleo y el criterio de zanja expuestos en una realización de la invención. Además, una fibra de pocos modos es fácil de fabricar y poco costosa. La capa de revestimiento interior puede tener una diferencia de índice de refracción negativa o positiva con el núcleo.

[0046] Según una tercera realización, para al menos una de dichas fibras $i \in \{[1; N]\}$ en dicho enlace óptico, dicho núcleo óptico tiene un índice de refracción mínimo que es igual a n_{Cii} , comprendiendo también dicho revestimiento

óptico una capa de revestimiento interior que rodea directamente dicho núcleo óptico, con un radio interior R_{1i} y un radio exterior $R_{2i} \geq R_{1i}$, siendo dicha capa de revestimiento interior una extensión de dicho perfil de índice de refracción gradual en α_i sencillo de dicho núcleo óptico, y teniendo dicha capa interior un índice de refracción mínimo

$$n_{1i} = n_{\text{trenchi}}$$

5 **[0047]** Aunque fabricar tal fibra de pocos modos es de alguna manera más difícil, en comparación con las realizaciones primera y segunda, dicho perfil de índice gradual asistido por zanja, permite una mejor optimización del parámetro α del perfil de índice gradual.

[0048] Otro aspecto de la revelación se refiere a un sistema óptico que comprende, al menos, una fibra óptica como se describió aquí anteriormente en cualquiera de sus realizaciones.

10 **[0049]** Se observa que los enlaces ópticos de FMF descritos en y a través de este son adecuados para su utilización dentro de, como mínimo, toda la "banda C", pero también en algunos casos bandas S-, C- U- y -L.

5. RELACIÓN DE FIGURAS

15 **[0050]** Otras características y ventajas de las realizaciones de la invención resultarán a partir de la siguiente descripción, dada a modo de ejemplos indicativos y no exhaustivos y a partir de los dibujos adjuntos, en los cuales:

- La figura 1, representa esquemáticamente un enlace óptico de acuerdo con una realización de la invención, comprendiendo tal enlace óptico varias fibras ópticas de pocos modos;

20 - La figura 2, representa esquemáticamente una sección transversal de una fibra óptica de acuerdo con una o más realizaciones aquí descritas;

- la figura 3A proporciona gráficamente el perfil de índice de refracción de una fibra óptica de acuerdo con una primera realización de la invención;

- La figura 3B proporciona gráficamente el perfil de índice de refracción de una fibra óptica de acuerdo con una segunda realización de la invención;

25 - La figura 3C proporciona gráficamente el perfil de índice de refracción de una fibra óptica de acuerdo con una tercera realización de la invención;

- La figura 4 ilustra cómo los retados de grupo de modo diferencial, disminuyen como una función de R_1 para fibras de pocos modos que soportan de 6 a 16 modos PL guiados para estructuras de zanjas de índice gradual de acuerdo con la invención;

30 - la figura 5 muestra el criterio C establecido en la invención para fibras de pocos modos para estructuras que soportan de 6 a 16 modos PL guiados en función de R_1 para estructuras asistidas por zanja de índice gradual de acuerdo con la invención;

- La figura 6, representa gráficamente el $\text{Max} |\text{DMGD}|$ como función de la longitud de onda para algunas realizaciones de la invención;

35 - La figura 7, ilustra el $\text{Max} |\text{DMGD}|$ como una función de α para algunas realizaciones de la invención;

- Las figuras 8A y 8B ilustran sistemas ópticos de acuerdo con realizaciones de la invención.

6. DESCRIPCIÓN DETALLADA

40 **[0051]** El principio general de la invención es proponer un enlace de fibras ópticas de pocos modos con índice gradual asistido cuidadosamente diseñado, que muestra un retardo de grupo de modo diferencial reducido y que soporta más modos PL comparadas con las FMF de la técnica anterior. Más precisamente, el propósito de tal enlace óptico es, entre otros, compensar las pequeñas variaciones de perfil que pueden ocurrir durante el proceso de fabricación de una fibra de pocos modos mediante la concatenación de varias FMF que muestran diferentes características. Un enlace óptico de este tipo permite alcanzar una compensación mejorada con respecto a las FMF de la técnica anterior entre un retardo de grupo de modo diferencial reducido, pérdidas por curvatura reducidas y unas mayores pérdidas de fuga. Además, el diseño de tales enlaces de FMF compensados en DMGD es una forma eficaz y robusta de alcanzar DMGD bajos.

45 **[0052]** La luz que viaja en una fibra óptica forma realmente 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 están dos veces degenerados, mientras que los modos PL_{mp} con $m \geq 1$ están degenerados por cuatro veces. 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 PL admite la propagación de todos los modos PL_{01} y PL_{11} , o una fibra de pocos modos que guía 6 modos PL soporta la propagación de todos los modos PL_{01} , PL_{11} , PL_{02} , PL_{21} , PL_{12} y PL_{31} .

50 **[0053]** Ahora se hará referencia en detalle a las realizaciones de fibras ópticas de pocos modos comprendidas en un enlace óptico de acuerdo con una realización de la invención, cuyos ejemplos 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.

60 **[0054]** Una realización de un enlace de fibra óptica de pocos modos de acuerdo con la invención se representa esquemáticamente en la figura 1. El enlace óptico 70, se construye concatenando varias fibras de pocos modos (por ejemplo, tal enlace óptico 70 comprende p amplitudes de fibras ópticas con $p \geq 2$, que se empalman. La figura 1 solo muestra fibra óptica 701 y fibra óptica 70p, estando simbolizadas todas las otras fibras ópticas potenciales $i \in \{1; p\}$ del enlace óptico por líneas discontinuas).

65 **[0055]** La fibra de pocos modos 1 tiene una longitud L_1 , la fibra i de pocos modos tiene una longitud L_i y la fibra p de pocos modos tiene una longitud L_p . Como se describirá con más detalle a continuación, tales longitudes L_1, \dots, L_i, \dots

Lp se eligen de manera que el enlace óptico 70 satisfaga un criterio de calidad de comunicaciones ópticas definido por la siguiente ecuación:

$$C = 10 \cdot \frac{\text{Max}|DMGD_{link}|}{(R_{1link}^2 \cdot Dn_{1link})^3} \leq 18$$

donde DMGDlink es el retardo de grupo de modo diferencial entre dos modos guiados en el enlace óptico 70, donde

$$R_{1link} = \frac{\sum_{i=1}^p R_{1i} L_i}{\sum_{i=1}^p L_i},$$

$$Dn_{1link} = \frac{\sum_{i=1}^p Dn_{1i} L_i}{\sum_{i=1}^p L_i}$$

y donde

con $Dn_{1i} = n_{0i} - n_{ci}$ es la diferencia del índice núcleo-revestimiento en $\lambda = 1550\text{nm}$ para la fibra óptica $i \in \{[1; p]\}$. Además, al menos una de las fibras ópticas 1 a p en el enlace 70 tiene un radio de núcleo óptico R_{1i} tal que $R_{1i} \geq 13,5 \mu\text{m}$, $i \in \{[1; p]\}$.

[0056] Las fibras de pocos modos 1 a p se empalman juntas para formar un enlace óptico 70 de longitud $L = L_1 + \dots + L_i + \dots + L_p$, que puede ser de varias decenas o varios cientos de kilómetros.

[0057] Por supuesto, la presente descripción abarca cualquier número de fibras de pocos modos concatenadas para formar un enlace óptico; como un mero ejemplo, tal enlace puede comprender solo dos FMF, cuatro FMF, o incluso varias decenas de FMF.

[0058] La siguiente descripción se centrará ahora en la estructura y las características de las fibras ópticas que componen un enlace óptico de acuerdo con la invención.

6.1 FIBRAS ÓPRICAS DE POCOS MODOS

[0059] Una realización de una fibra óptica de pocos modos utilizada en un enlace óptico según la invención se representa esquemáticamente en sección transversal en la figura 2. 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 $13,5 \mu\text{m}$ hasta aproximadamente $20 \mu\text{m}$. El revestimiento generalmente tiene un radio interior 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 tener generalmente simétrica circular 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 $62,5 \mu\text{m}$. Sin embargo, debe entenderse que las dimensiones del revestimiento pueden ajustarse de manera que el radio R_4 puede ser mayor o menor de $62,5 \mu\text{m}$. La fibra óptica 10 también comprende un recubrimiento 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 2. Debe tenerse en cuenta que R_4 y R_5 son los límites inferior y superior del recubrimiento, cualquiera que sea el número de capas intermedias. En algunas realizaciones descritas en este documento, el radio R_5 es aproximadamente $122,5 \mu\text{m}$ (pero podría ser mayor o menor de $122,5 \mu\text{m}$). En realizaciones alternativas, otras dimensiones podrían ser tales que $R_4 = 40 \mu\text{m}$ o $R_4 = 50 \mu\text{m}$, y $R_5 = 62,5 \mu\text{m}$.

[0060] Todas las fibras de pocos modos de un enlace óptico según la invención comparten las características comunes descritas anteriormente en relación a la figura 2.

[0061] La figura 3A 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 representándose en el eje y el índice de refracción, expresado como una diferencia de índice Dn a menos que se indique lo contrario.

[0062] De acuerdo con realizaciones de la invención, es posible que solo una, varias, o todas, o incluso ninguna de las fibras ópticas que componen un enlace óptico según la invención muestren el índice de refracción de la figura 3A.

[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 de índice de refracción normalizada con

n_1 es el índice de refracción mínimo del núcleo óptico,

n_0 es el índice de refracción máximo del núcleo óptico,

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

5 **[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, la del vidrio de sílice. Esta zanja 40 tiene una diferencia de índice de refracción negativa $Dn_3 = n_{\text{trench}} - n_{\text{Cl}}$ respecto del índice de refracción del revestimiento exterior, y su posición y tamaño están diseñados para mejorar la resistencia a pérdidas por curvatura de la fibra.

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

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

15 donde $Dn_3 = n_{\text{trench}} - n_{\text{Cl}}$ es la diferencia de índice de revestimiento de zanja para $\lambda = \lambda_c$, una longitud de onda central de una banda operativa a la que se destina la fibra óptica (por ejemplo $\lambda = 1550\text{nm}$). 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 estar separada del núcleo 20 por la capa de revestimiento interior 30. Alternativamente, la zanja 40 puede rodear y estar en contacto directamente con la porción de núcleo 20.

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

25 **[0069]** Las diferentes porciones 30, 40, 50 del revestimiento pueden constar de vidrio de sílice puro (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 porción del revestimiento está "supra dopada", o vidrio de sílice con un dopante, lo que disminuye el índice de refracción, como el flúor, como cuando la parte del revestimiento está infra dopada (por ejemplo, para la zanja 40)

30 **[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 $r > R_3$.

[0071] En la primera realización ilustrada por la figura 3A, el índice de refracción mínimo del núcleo n_1 es igual al índice de refracción del revestimiento exterior n_{Cl} .

[0072] La zanja 40 infra dopada puede proporcionar una menor pérdidas por curvatura.

35 **[0073]** La figura 3B representa el perfil de índice de refracción $n(r)$ de una fibra óptica de acuerdo con una segunda realización de la invención. Una vez más, puede haber realizaciones de la invención en las que solo una, varias, o todas, o incluso ninguna de las fibras ópticas en dicho enlace óptico muestran el perfil de la figura 3B.

[0074] Dicho 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 externo n_{Cl} pero puede mostrar una diferencia de índice de refracción negativa o un positiva (mostrada en línea discontinua líneas en la figura 2B) con respecto al revestimiento exterior de fibra óptica. Cuando el revestimiento comprenda una capa de revestimiento interior 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 una diferencia de índice de refracción negativa o positiva (mostrado en líneas discontinuas en la figura 2B) $Dn_2 = n_2 - n_{\text{Cl}}$ con respecto al revestimiento exterior de fibra óptica.

45 **[0075]** Como en la primera realización, el revestimiento externo 50 también puede comprender otras porciones o capas con índices de refracción más bajos o más altos, para $r > R_3$.

[0076] Como en la primera realización, la zanja 40 está diseñada preferiblemente para cumplir el siguiente criterio:

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

50 donde $Dn_3 = n_{\text{trench}} - n_{\text{Cl}}$ es la diferencia de índice de revestimiento de zanja en $\lambda = \lambda_c$, una longitud de onda central de una banda operativa para la cual se destina la fibra óptica (por ejemplo $\lambda = 1550\text{nm}$).

[0077] La figura 3C representa el perfil de índice de refracción $n(r)$ de una fibra óptica de acuerdo con una tercera realización de la invención. Una vez más, puede haber realizaciones de la invención en las que solo una, varias, o todas, o incluso ninguna de las fibras ópticas en dicho enlace óptico muestren el perfil de la figura 3C.

55 **[0078]** En esta tercera realización, la capa de revestimiento interno 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:

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

dónde:

r es una variable representativa del radio de la fibra óptica, R2 es el radio exterior de la capa de revestimiento interior

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

30, siendo Δ la diferencia de índice de refracción normalizada con

n₁ es el índice de refracción mínimo de la capa de revestimiento interior (es decir, el índice de refracción en el radio R₂),

5 n₀ 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 de la capa de revestimiento interior.

[0079] Por lo tanto, en esta tercera realización, el término "un perfil de índice gradual único" tiene un significado ligeramente diferente 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.

10 [0080] El revestimiento óptico también comprende, al menos, un anillo de índice deprimido 40, con radio interior R₂ y radio exterior R₃, y una capa exterior de revestimiento 50 con radio interior R₃. En algunas realizaciones, dicha capa exterior de revestimiento 50 consta de vidrio de sílice puro (SiO₂) y su índice de refracción n_{Cl} es, por tanto, el del vidrio de sílice. La zanja 40 tiene una diferencia de índice de refracción negativa Dn₃ = n_{trench} - n_{Cl} con respecto al índice de refracción del revestimiento exterior, y su posición y tamaño se diseñan para mejorar la resistencia a pérdidas por curvatura de la fibra.

15 [0081] Como en las realizaciones primera y segunda, el revestimiento exterior 50 también puede comprender otras porciones o capas con índices de refracción más bajos o más altos, para r > R₃.

20 [0082] Como en las realizaciones primera y segunda, la zanja 40 está diseñada preferiblemente para cumplir el siguiente criterio:

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

donde Dn₃ = n_{trench} - n_{Cl}, es la diferencia de índice de revestimiento de zanja en λ = λC, una longitud de onda central de una banda operativa para la cual se destina la fibra óptica (por ejemplo λ = 1550nm).

25 [0083] La figura 4 ilustra cómo el máximo del retardo de grupo de modo diferencial Max |DMGD| entre cualesquiera dos modos PL guiados en la fibra óptica disminuye en función del radio del núcleo R₁ para las FMF que guían los modos 6, 9, 12 y 16, de acuerdo con una de las realizaciones de las figuras 3A hasta 3C. El eje x representa el radio del núcleo de la fibra R₁, que varía desde 12 hasta 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.

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

35 [0084] La figura 5 ilustra conjuntamente como el criterio donde DMGD es el retardo de grupo de modo diferencial entre dos modos guiados en dicha fibra óptica y donde Dn₁ = n₀ - n_{Cl} es la diferencia del índice núcleo-revestimiento en λ = λC, una longitud de onda central de una banda operativa para la cual la fibra óptica es previsto, también disminuye en función del radio del núcleo R₁ para las FMF que guían 6, 9, 12 y 16 modos de acuerdo con una de las realizaciones de las figuras 3A-3C. El eje x representa el radio del núcleo de la fibra R₁, que varía desde 12 hasta 16 μm. El eje y representa el criterio C que va desde 0 hasta 30. La curva 41 corresponde a una FMF que guía 6 modos PL; la curva 42 corresponde a una FMF que guía 9 modos 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.

40 [0085] Como puede observarse en ambas figuras, se puede obtener una buena compensación estableciendo el radio del núcleo R₁ ≥ 13,5 μm. Esto permite alcanzar valores bajos para Max |DMGD|, cualquiera que sea el número de modos PL guiados en la fibra. Al establecer el límite inferior del radio del núcleo en 13,5 μm, es posible guiar una gran cantidad de modos PL en la FMF, y así alcanzar una buena capacidad por fibra, mientras que, gracias a los bajos valores de Max |DMGD|, se salvan largas distancias.

45 [0086] Una vez que el radio del núcleo se ha establecido en un valor mínimo de 13,5 μm, de la figura 5 puede deducirse que puede establecerse un límite superior adecuado para el criterio C en un valor de 18: C < 18. Tal el límite superior permisible para las FMF de la invención se ilustra mediante una línea recta horizontal 45 en la figura 4.

[0087] Como se puede observar en las figuras 4 y 5, para las FMF que admiten 6 modos guiados PL, la frecuencia

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

50 normalizada donde λ es la longitud de onda operativa está preferiblemente comprendida entre 7,8 y 9,8. Max |DMGD| es preferiblemente < 25 ps/km, y más preferiblemente < 15 ps/km, para λ, aquí 1550nm. Más generalmente, tales valores pueden alcanzarse para cualquier longitud de onda de transmisión central λC de cualquier banda de longitud de onda operativa a la que se destina la fibra óptica, tal como la banda C, o la banda L, S o U, por ejemplo. Max |DMGD| también es preferiblemente < 50 ps/km y más preferiblemente < 30 ps/km desde 1530 hasta 1570 nm. De manera más general, tales valores se pueden lograr para cualquier banda de longitud de onda operativa [λC - δλ; λC + δλ] donde 2 δλ es un ancho de dicha banda operativa, preferiblemente δλ = 20nm, tal como la banda C, o la banda L, S o U, por ejemplo.

55 [0088] Para FMF que soportan 9 modos guiados PL, V está preferiblemente comprendida entre 9,8 y 11,8. Max |DMGD| es preferiblemente < 100 ps/km, y más preferiblemente < 60 ps/km, a λ, aquí 1550nm (y más generalmente

para cualquier longitud de onda de transmisión central λ_C de cualquier banda de longitud de onda operativa a la que se destina la fibra óptica). Max |DMGD| también es preferiblemente < 200 ps/km y más preferiblemente < 120 ps/km de 1530 a 1570nm. De manera más general, tales valores se pueden lograr 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 $\delta\lambda = 20$ nm, tal como la banda C, o la banda L, S o U, por ejemplo.

[0089] Para las FMF que soportan 12 modos guiados PL, V está preferiblemente entre 11,8 y 13,8. Max |DMGD| es preferiblemente < 150 ps/km y más preferiblemente < 120 ps/km, en λ , aquí 1550nm. Más generalmente, tales valores pueden alcanzarse para cualquier longitud de onda de transmisión central λ_C de cualquier banda de longitud de onda operativa a la que se destina la fibra óptica, tal como la banda C, o la banda L, S o U, por ejemplo. Max |DMGD| también es preferiblemente < 300 ps/km y más preferiblemente < 250 ps/km desde 1530 hasta 1570 nm. De manera más general, tales valores se pueden lograr 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 $\delta\lambda = 20$ nm, tal como la banda C, o la banda L, S o U, por ejemplo.

[0090] Para las FMF que soportan 16 modos guiados PL, V está preferiblemente comprendida entre 13,8 y 15,9. Max |DMGD| es preferiblemente < 300 ps/km y más preferiblemente < 250 ps/km, en λ , aquí 1550nm. Más generalmente, tales valores pueden alcanzarse para cualquier longitud de onda de transmisión central λ_C de cualquier banda de longitud de onda operativa a la que se destina la fibra óptica, tal como la banda C, o la banda L, S o U, por ejemplo. Max |DMGD| también es preferiblemente < 600 ps/km y más preferiblemente < 500 ps/km desde 1530 hasta 1570 nm. De manera más general, tales valores pueden lograrse 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 $\delta\lambda = 20$ nm, tal como la banda C, o la banda L, S o U, por ejemplo.

[0091] Además, para las FMF que soportan 4 modos guiados PL, la frecuencia normalizada V está comprendida preferiblemente entre 5,7 y 7,8. Max |DMGD| es preferiblemente < 20 ps/km, y más preferiblemente < 10 ps/km, a 1550 nm. Más generalmente, tales valores pueden alcanzarse para cualquier longitud de onda de transmisión central λ_C de cualquier banda de longitud de onda operativa a la que se destina la fibra óptica, tal como la banda C, o la banda L, S o U, por ejemplo. Max |DMGD| también es preferiblemente < 30 ps/km y más preferiblemente < 20 ps/km desde 1530 hasta 1570 nm. De manera más general, tales valores se pueden lograr 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 $\delta\lambda = 20$ nm, tal como la banda C, o la banda L, S o U, por ejemplo.

[0092] Todos los modos PL guiados de las FMF según una realización de la invención tienen áreas efectivas, $A_{eff} < 400\mu m^2$, preferiblemente $< 350\mu m^2$, y pérdidas por curvatura < 100 dB/vuelta, preferiblemente < 50 dB/vuelta, en un radio de curvatura de 10mm a 1550nm, y todos los modos PL de fuga tienen pérdidas de fuga $> 0,1$ dB/m, preferiblemente $> 0,5$ dB / m, a 1550nm, por lo que se cortan después de algunas decenas de metros de propagación (pérdida (fugas) $> 19,34$ dB). 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, PL01), a una longitud de onda de 1550 nm, a menos que se especifique lo contrario.

[0093] La tabla 1 proporciona los parámetros de los perfiles de índice de ejemplos de FMF de acuerdo con la realización de la figura 3B, y los resultados en Max |DMGD|, C criterio específico núcleo y T criterio zanja.

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 | -0,59 | 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 |

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

- 5 **[0094]** En la tabla 1, el criterio del núcleo es el parámetro C tal como define como $T = 1000 \cdot [(R_3 - R_2) \cdot Dn_3 \cdot (R_1^2 \cdot Dn_1)]$. De acuerdo una realización preferida $55 \leq T \leq 150$. Como se puede observar, 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 "bajo" número de modos PL (es decir, 4), la compensación entre las pérdidas por curvatura y las pérdidas por fuga se cumple con mayor facilidad.
- 10 **[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, los modos PL01, PL11, PL21 y PL02.

Tabla 2:

| Ej. 0 | Dn _{eff} (x10 ³) | Pérdidas de fuga (dB/m) | A _{eff} (μm ²) | CD (ps/nm-km) | Pérdidas por curvatura (dB/vuelta) | DMGD frente PL01 (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 | 4,8 | -1,5 |
| PL12 | <0 | 13,7 | | | | |
| PL31 | <0 | 2,4 | | | | |

- 15 **[0096]** En la tabla 2, así como en las tablas 3 a 6 descritas a continuación, Dn_{eff} 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 de material, la dispersión de guía de onda y la dispersión intermodal) y las pérdidas de curvatura, expresadas como dB/vuelta, se dan para un radio de curvatura de 10 mm. A_{eff} expresado como μm² designa el área efectiva del modo PL guiado. El retardo de grupo de modo diferencial DMGD se mide con respecto al primer modo guiado PL01 y se expresa como ps/km. PL12 y PL31, son modos de fuga.
- 20 **[0097]** La tabla 3 proporciona las características de los modos PL de los ejemplos de la tabla 1 que soportan 6 modos PL guiados, es decir los ejemplos 1, 2 y 3, a una longitud de onda $\lambda = 1550\text{nm}$.

Tabla 3:

| Ej.3 | D _{neff} (x10 ³) | Pérdidas de fuga (dB/m) | A _{eff} (μm ²) | CD (ps/nm-km) | Pérdidas por curvatura (dB/vuelta) | DMGD frente PL01 (ps/km) |
|-------|--|----------------------------|--|------------------|---|-----------------------------------|
| 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 | D _{neff} (x10 ³) | Pérdidas de fuga (dB/m) | A _{eff} (μm ²) | CD (ps/nm-km) | Pérdidas por curvatura (dB/vuelta) | DMGD frente PL01 (ps/km) |
| 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 | D _{neff} (x10 ³) | Pérdidas de fuga (dB/m) | A _{eff} (μm ²) | CD (ps/nm-km) | Pérdidas por curvatura (dB/vuelta) | DMGD frente PL01 (ps/km) |
| 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 | 17,4 | | | | |
| PL22 | <0 | 9,9 | | | | |
| PL41 | <0 | 0,9 | | | | |

[0098] PL03, PL22 y PL41 son modos de fuga.

- 5 [0099] La tabla 4 proporciona las características de los modos PL de los ejemplos de la tabla 1 que soportan 9 modos PL guiados, 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.

Tabla 4:

| Ej.4 | Dn_{eff} ($\times 10^3$) | Pérdidas de fuga (dB/m) | A_{eff} (μm^2) | CD (ps/nm-km) | Pérdidas por curvatura (dB/vuelta) | DMGD frente PL01 (ps/km) |
|-------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------|---|-----------------------------------|
| PL01 | 11,75 | / | 104 | 19,3 | 0,0 | / |
| PL11 | 9,23 | / | 140 | 19,6 | 0,0 | -22,5 |
| PL21 | 6,72 | / | 188 | 20,0 | 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 | | | | | | |
| PL32 | <0 | 47,4 | | | | |
| PL51 | <0 | 1,6 | | | | |
| Ej. 5 | Dn_{eff} ($\times 10^3$) | Pérdidas de fuga (dB/m) | A_{eff} (μm^2) | CD (ps/nm-km) | Pérdidas por curvatura (dB/vuelta) | DMGD frente PL01 (ps/km) |
| PL01 | 10,41 | / | 119 | 19,6 | 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 **[0100]** La tabla 5 proporciona las características de los modos PL de los ejemplos de la tabla 1 que soportan 12 modos PL guiados (ejemplos 6 y 7). PL04, PL23, PL42 y PL61 son modos de fuga.

Tabla 5:

| Ej.6 | $D_{n_{eff}}$ ($\times 10^3$) | Pérdidas de fuga (dB/m) | A_{eff} (μm^2) | CD (ps/nm-km) | Pérdidas por curvatura (dB/vuelta) | DMGD frente PL01 (ps/km) |
|-------|------------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------|---|-----------------------------------|
| 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 | -38,5 |
| PL 41 | 4,85 | / | 221 | 19,9 | 0,0 | -45,3 |
| PL13 | 2,00 | / | 260 | 19,0 | 5,8 | -68,4 |
| PL32 | 1,98 | / | 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 | $D_{n_{eff}}$ ($\times 10^3$) | Pérdidas de fuga (dB/m) | A_{eff} (μm^2) | CD (ps/nm-km) | Pérdidas por curvatura (dB/vuelta) | DMGD frente PL01 |
| 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 | -2,6 |
| 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 | 750,2 | | | | |
| PL42 | <0 | 145,0 | | | | |
| PL61 | <0 | 3,0 | | | | |

5 [0101] La tabla 6 proporciona las características de los modos PL de los ejemplos de la tabla 1 que soportan 16 modos PL guiados (ejemplos 8, 9 y 10). PL14, PL33, PL52 y PL71 son modos de fuga

ES 2 667 796 T3

Tabla 6:

| Ej.8 | D _{neff} (x10 ³) | Pérdidas de fuga (dB/m) | A _{eff} (μm ²) | CD (ps/nm-km) | Pérdidas por curvatura (dB/vuelta) | DMGD frente PL01 (ps/km) |
|--------|--|----------------------------|--|------------------|---|-----------------------------------|
| PL01 | 22,50 | / | 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 | 19,0 | 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 | 19,3 | 0,0 | -34,2 |
| PL32 | 5,69 | / | 245 | 19,5 | 0,0 | -43,8 |
| PL51 | 5,64 | / | 214 | 19,6 | 0,0 | -67,9 |
| PL04 | 2,39 | / | 301 | 16,8 | 6,4 | -106,8 |
| PL23 | 2,37 | / | 272 | 17,5 | 2,2 | -80,2 |
| PL42 | 2,34 | / | 276 | 19,0 | 0,4 | -8,2 |
| PL61 | 2,29 | / | 234 | 19,9 | 0,0 | 9,8 |
| PL14 | <0 | 271,8 | | | | |
| PL33 | <0 | 125,1 | | | | |
| PL52 | <0 | 11,8 | | | | |
| PL71 | <0 | 0,2 | | | | |
| Ej. 9 | D _{neff} (x10 ³) | Pérdidas de fuga (dB/m) | A _{eff} (μm ²) | CD (ps/nm-km) | Pérdidas por curvatura (dB/vuelta) | DMGD frente PL01 (ps/km) |
| PL01 | 19,61 | / | 88 | 17,8 | 0,0 | 0 |
| PL11 | 16,65 | / | 119 | 16,2 | 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 | 19,8 | 0,0 | -78,7 |
| 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 | D _{neff} (x10 ³) | Pérdidas de fuga (dB/m) | A _{eff} (μm ²) | CD (ps/nm-km) | Pérdidas por curvatura (dB/vuelta) | DMGD frente PL01 (ps/km) |
| PL01 | 16,58 | / | 102 | 18,5 | 0,0 | / |
| PL11 | 14,03 | / | 138 | 18,8 | 0,0 | -51,3 |
| PL21 | 11,50 | / | 188 | 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 | | | | |
| PL71 | <0 | 1,9 | | | | |

[0102] La figura 6 ilustra la evolución de Max |DMGD| como una función de la longitud de onda para fibras de pocos modos compatibles con modos guiados de 6 a 16 PL. Más precisamente, la figura 6 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 la fibra de pocos modos de acuerdo con la segunda realización de la invención, como se representa en la figura 3B.

[0103] 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 PL guiados, expresados 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 9 modos 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.

[0104] Como se puede ver, Max |DMGD| permanece bajo en toda la banda C extendida desde 1530 hasta 1570 nm. La pendiente de 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.

[0105] La figura 7 representa la evolución de Max |DMGD| para la FMF que admiten de 6 a 16 modos PL guiados como una función del parámetro α del perfil de índice gradual. Más precisamente, la figura 7 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 3B.

[0106] 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 en el margen 1,91 a 1,99. El eje y representa el Max |DMGD| entre cualesquiera dos modos PL guiados, expresado como ps/km y que va desde 0 hasta 200. La curva 61 corresponde a la FMF que guía 6 modos PL del ejemplo 2; la curva 62 corresponde a los 9 modos PL guiados de la FMF del ejemplo 4; la curva 63 corresponde a los 12 modos PL guiados de la FMF del ejemplo 7, mientras que la curva 64 corresponde a los 16 modos PL guiados de la FMF del ejemplo 8.

[0107] Como se muestra en la figura 7, hay valores óptimos para α , para los que Max |DMGD| tienen valores mínimos. Los α más bajos y más altos que estos " α óptimos" generalmente muestran DMGD con signos opuestos.

[0108] Seleccionando cuidadosamente el valor α , lo más próximo al óptimo, es posible diseñar una fibra de pocos modos minimizando el valor Max |DMGD|. Las fibras ópticas de pocos modos 10 según la revelación de bajas pérdidas y un pequeño retardo de grupo diferencial, y son adecuadas para su utilización en sistemas de transmisión óptica, particularmente aquellos que utilizan multiplexado por división espacial y que están configurados para transmisión de larga distancia.

6.2 ENLACE DE FIBRAS ÓPTICAS DE POCOS MODOS

[0109] Como se mencionó anteriormente, hay valores óptimos de α , para los cuales Max |DMGD| tiene valores mínimos, y α más bajos y más altos que estos " α óptimos" generalmente muestran DMGD signos opuestos.

[0110] Como consecuencia, los inventores han llegado a la conclusión de que, si una FMF está fuera de objetivo en términos de α (es decir, si el valor de α de la FMF es ligeramente más alto o más bajo que el " α óptimo" mostrado en la figura 7), es posible asociarla con otra FMF que muestre un α apropiado (es decir, superior al " α óptimo" si el α fuera del objetivo es pequeño, o más pequeño que el " α óptimo" si el α fuera de objetivo es más alto), eligiendo las longitudes apropiadas para ambas FMF, para así para realizar un enlace "DMGD-compensado".

[0111] El Max |DMGD| del enlace resultante puede estar muy próximo al valor mínimo que se muestra en la figura 7. Esta asociación puede, por ejemplo, compensar la variabilidad del proceso que puede resultar en FMF con Alfas ligeramente fuera de objetivo.

[0112] Las tablas 6, 7, 8 y 9 muestran ejemplos de estas asociaciones para FMF que soportan 6, 9, 12 y 16 modos PL guiados PL, respectivamente.

Tabla 6:

| Ej. 2 | Alfa _{opt} 1,951 | Alfa _{fuera-objetivo} 1,956 | Alfa _{comp} 1,910 | Combinación de Alfas con L _{comp} /L _{opt} =0,128 |
|----------------------|------------------------------|---|-------------------------------|---|
| | DMGD frente PL01 (ps/km) | DMGD frente PL01 (ps/km) | DMGD frente PL01 (ps/km) | DMGD frente PL01 (ps/km) |
| PL01 | / | / | / | / |
| PL11 | -7,6 | 1,6 | -81,6 | -7,9 |
| PL21 | -6,5 | 11,7 | -151,8 | -6,9 |
| PL02 | -7,8 | 10,1 | -150,3 | -8,1 |
| PL12 | -7,5 | 17,5 | -206,1 | -7,9 |
| PL31 | 0,8 | 27,2 | -209,7 | 0,3 |
| Max DMGDI (ps/km) | 8,6 | 27,2 | 206,7 | 8,4 |

- 5 **[0113]** La tabla 6 muestra los valores de DMGD y de Max |DMGD|, expresados como ps/km, a una longitud de onda $\lambda = 1550\text{nm}$ para fibras de pocos modos que soportan 6 modos PL guiados de acuerdo con el ejemplo 2 (ya discutido en la tabla 1 y la tabla 2). De acuerdo con los resultados que se muestran en la figura 7, el valor óptimo de α para dicha FMF es $\alpha_{\text{opt}} = 1,951$. La columna 2 de la tabla 6 muestra los valores de DMGD y de Max |DMGD| a una longitud de onda $\lambda = 1550\text{ nm}$ para una FMF según el ejemplo 2 que muestra un valor óptimo de α . La columna 3 de la tabla 6 muestra los valores de DMGDs y de Max |DMGD| a una longitud de onda $\lambda = 1550\text{nm}$ para una FMF de acuerdo con el ejemplo 2, que mostraría un α ligeramente fuera de objetivo, por ejemplo $\alpha_{\text{fuera de objetivo}} = 1,956$.
- 10 **[0114]** La columna 4 de la tabla 6 proporciona los valores de DMGD y de Max |DMGD| a una longitud de onda $\lambda = 1550\text{nm}$ para una FMF según el ejemplo 2, que mostraría un valor de α , por ejemplo $\alpha_{\text{comp}} = 1,910$, que podría usarse en concatenación con la FMF de la columna 3, para construir una óptica de enlace compensado en DMGD.
- 15 **[0115]** La última columna en la tabla 6 da los valores de DMGD y de Max |DMGD| a una longitud de onda $\lambda = 1550\text{ nm}$ para un enlace óptico construido al concatenar la FMF de la columna 3 con una longitud L_{opt} y la FMF de la columna 4 con una longitud L_{comp} . La longitud total del enlace es $L_{\text{link}} = L_{\text{opt}} + L_{\text{comp}}$, donde L_{opt} y L_{comp} son tales que $L_{\text{comp}}/L_{\text{opt}} = 0,128$.
- 20 **[0116]** Dicha relación se elige para que sea igual, o muy próxima a, la relación de los valores absolutos de los DMGD de los modos que tienen los valores más altos de DMGD para ambas fibras del enlace. En el ejemplo 2 descrito en la tabla 6, dicho modo superior es el modo PL31, para el cual la relación entre los valores absolutos de los DMGD para ambas fibras del enlace óptico es $|27,2/209,7| = 0,13$. En esta realización, se elige una relación de las longitudes de fibras ópticas próxima a 0,13, tal que $L_{\text{comp}}/L_{\text{opt}} = 0,128$. Por lo tanto, se eligen las longitudes L_{opt} y L_{comp} para minimizar Max |DMGD| del enlace óptico.
- 25 **[0117]** Como se muestra en la tabla 6, los valores de DMGD y de Max |DMGD| para el enlace óptico compensado en DMGD están, por lo tanto, muy próximos de los valores mínimos. Tal enlace óptico permite guiar seis modos PL, con un DGMD muy bajo y, por lo tanto, se alcanza un sistema muy bueno.
- [0118]** Dicho enlace óptico cumple el criterio de núcleo $I_C < 18$, y está compuesto por dos FMF, que cumplen, individualmente el criterio de núcleo $C < 18$.

Tabla 7:

| Ej. A | Alfa _{opt} 1,944 | Alfa _{fuera-objetivo} 1,938 | Alfa _{comp} 1,990 | Combinación de Alfas con L _{comp} /L _{opt} =0,134 |
|----------------------|------------------------------|---|-------------------------------|---|
| | DMGD frente PL01 (ps/km) | DMGD frente PL01 (ps/km) | DMGD frente PL01 (ps/km) | DMGD frente PL01 (ps/km) |
| PL01 | / | / | / | / |
| PL11 | -22,5 | -35,7 | 74,6 | -22,7 |
| PL21 | -25,1 | -51,4 | 168,2 | -25,4 |
| PL02 | -20,1 | -46,2 | 172,4 | -20,4 |
| PL12 | -24,3 | -62,6 | 259,1 | -24,6 |
| PL31 | -16,7 | -55,7 | 270,9 | -17,1 |
| PL03 | -16,1 | -63,6 | 337,2 | -16,2 |
| PL22 | -17,8 | -66,4 | 342,9 | -18,0 |
| PL41 | 0,3 | -58,7 | 377,1 | -0,1 |
| Max DMGDI (ps/km) | 25,4 | 66,4 | 302,5 | 25,4 |

- 5 [0119] La tabla 7 muestra los valores de DMGD y de Max |DMGD|, expresados como ps/km, a una longitud de onda $\lambda = 1550\text{nm}$ para fibras de pocos modos que soportan 9 modos PL guiados de acuerdo con el ejemplo 4 (ya discutido en la tabla 1 y la tabla 3). De acuerdo con los resultados mostrados en la figura 7, el valor óptimo de α para tal FMF es $\alpha_{opt} = 1,944$. La columna 2 de la tabla 7 muestra los valores de DMGD y de Max |DMGD| a una longitud de onda $\lambda = 1550\text{nm}$ para una FMF según el ejemplo 4 que muestra un valor óptimo de α . La columna 3 de la tabla 7 muestra los valores de DMGD y de Max |DMGD| a una longitud de onda $\lambda = 1550\text{nm}$ para una FMF de acuerdo con el ejemplo 4, que mostraría un α levemente fuera de objetivo, por ejemplo $\alpha_{fueraobjetivo} = 1,938$.
- 10 [0120] La columna 4 de la tabla 7 muestra los valores de DMGD y de Max |DMGD| a una longitud de onda $\lambda = 1550\text{nm}$ para una FMF de acuerdo con el ejemplo 4, que mostraría un valor de α , por ejemplo $\alpha_{comp} = 1.990$, que podría usarse en la concatenación con la FMF de la columna 3, para construir un enlace óptico compensado en DMGD.
- 15 [0121] La última columna en la tabla 7 da los valores de DMGD y de Max |DMGD| a una longitud de onda $\lambda = 1550\text{nm}$ para un enlace óptico construido al concatenar la FMF en la columna 3 con una longitud L_{opt} y la FMF en la columna 4 con una longitud L_{comp} . La longitud total del enlace es $L_{link} = L_{opt} + L_{comp}$, donde L_{opt} y L_{comp} son tales que $L_{comp}/L_{opt} = 0,134$.
- 20 [0122] Tal relación se elige igual a, o muy próxima a, la relación de los valores absolutos de las DMGD de los modos que tienen los valores más altos de DMGD para ambas fibras del enlace. En el ejemplo 4 descrito en la tabla 7, dicho modo más elevado es el modo PL41, para el cual la relación de los valores absolutos de los DMGD para ambas fibras en el enlace óptico es $|-50,7/377,1| = 0,13$. En esta realización, se elige una relación de las longitudes de fibras ópticas próxima a 0,13, tal como $L_{comp}/L_{opt} = 0,134$. Por lo tanto, se eligen las longitudes L_{opt} y L_{comp} para minimizar Max |DMGD| del enlace óptico.
- 25 [0123] Como se muestra en la tabla 7, los valores de DMGD y Max |DMGD| para el enlace óptico compensado en DMGD están, por lo tanto, muy próximos de los valores mínimos. Tal enlace óptico permite guiar nueve modos PL, con un DGMD muy bajo y, por lo tanto, se alcanza un muy buen sistema.
- 30 [0124] Dicho enlace óptico cumple el criterio de núcleo $C < 18$, y está compuesto por dos FMF, que cumplen individualmente el criterio de núcleo $C < 18$.

Tabla 8:

| Ej. 7 | Alfa _{opt} 1,934 | Alfa _{fuera-objetivo} 1,942 | Alfa _{comp} 1,990 | Combinación de Alfas con 10.230 |
|----------------------|------------------------------|---|-------------------------------|------------------------------------|
| | DMGD frente PL01 (ps/km) | DMGD frente PL01 (ps/km) | DMGD frente PL01 (ps/km) | DMGD frente PL01 (ps/km) |
| PL01 | / | / | / | / |
| PL11 | -48,2 | -30,4 | -125,6 | -48,2 |
| PL21 | -68,6 | -33,2 | | -68,5 |
| PL02 | -56,5 | -21,3 | -208,7 | -56,3 |
| PL12 | -52,1 | 0,2 | -278,0 | -51,8 |
| PL31 | -66,4 | -13,7 | -294,6 | -66,2 |
| PL03 | 18,1 | 86,1 | -274,9 | 18,8 |
| PL22 | -2,6 | 65,9 | -298,1 | -2,1 |
| PL41 | -37,0 | 32,7 | -338,1 | -36,6 |
| PL13 | -69,2 | 13,7 | -425,5 | -68,5 |
| PL32 | -3,7 | 80,3 | -365,5 | -3,0 |
| PL51 | 6,7 | 92,9 | -365,0 | 7,2 |
| Max DMGDI (ps/km) | 87,3 | 126,1 | 425,5 | 87,1 |

- 5 **[0125]** La tabla 8 muestra los valores de DMGD y Max |DMGD|, expresados como ps/km, a una longitud de onda $\lambda = 1550\text{nm}$ para fibras de pocos modos que soportan 12 modos guiados PL de acuerdo con el ejemplo 7 (ya discutido en la tabla 1 y la tabla 4). De acuerdo con los resultados que se muestran en la figura 7, el valor óptimo de α para dicha FMF es $\alpha_{\text{opt}} = 1,934$. La columna 2 de la tabla 8 muestra los valores de DMGD y Max |DMGD| a una longitud de onda $\lambda = 1550\text{nm}$ para una FMF según el ejemplo 7 que muestra un valor óptimo de α . La columna 3 de la tabla 8 muestra los valores de DMGD y Max |DMGD| a una longitud de onda $\lambda = 1550\text{nm}$ para una FMF de acuerdo con el
- 10 ejemplo 7, que se mostraría un valor α ligeramente fuera de objetivo, por ejemplo $\alpha_{\text{fuera-objetivo}} = 1,942$.
- [0126]** La columna 4 de la tabla 8 proporciona los valores de DMGD y Max |DMGD| a una longitud de onda $\lambda = 1550\text{nm}$ para una FMF según el ejemplo 7, que mostraría un valor α , por ejemplo $\alpha_{\text{comp}} = 1,900$, que podría usarse en concatenación con la FMF de la columna 3, para construir un enlace óptico compensado en DMGD.
- 15 **[0127]** La última columna en la tabla 8 da los valores de DMGD y Max |DMGD| a una longitud de onda $\lambda = 1550\text{nm}$ para un enlace óptico construido al concatenar la FMF de la columna 3 con una longitud L_{opt} y la FMF de la columna 4 con una longitud L_{comp} . La longitud total del enlace es $L_{\text{link}} = L_{\text{opt}} + L_{\text{comp}}$, donde L_{opt} y L_{comp} son tales que $L_{\text{comp}} / L_{\text{opt}} = 0,230$.
- [0128]** Tal relación se elige igual a, o muy próxima a, la relación de los valores absolutos de los DMGD de los modos que tienen los valores más altos de DMGD para ambas fibras del enlace. En el ejemplo 7 descrito en la tabla 8,
- 20 dicho modo más elevado es el modo PL51, para el cual la relación de los valores absolutos de los DMGD para ambas fibras del enlace óptico es $|92,9 / -365,0| = 0,25$. En esta realización, elegimos una relación de longitudes de fibras ópticas próximas a 0,25, tal que $L_{\text{comp}} / L_{\text{opt}} = 0,230$. Por lo tanto, se eligen las longitudes L_{opt} y L_{comp} para minimizar Max |DMGD| del enlace óptico.
- [0129]** Como se muestra en la tabla 8, los valores de DMGD y Max |DMGD| para el enlace óptico compensado en DMGD están muy próximos a los valores mínimos. Tal enlace óptico permite guiar doce modos PL, con DGMD muy
- 25 bajos y, por lo tanto, alcanzar un muy buen sistema.
- [0130]** Dicho enlace óptico cumple el criterio de núcleo $C < 18$, y está compuesto por dos FMF, que cumplen individualmente el criterio de núcleo $C < 18$.

Tabla 9:

| Ej. 8 | Alfa _{Opt} 1,926 | Alfa _{Opt-objetivo} 1,916 | Alfa _{comp} 1,990 | Combinación de Alfas con L _{comp} /L _{opt} =0,150 |
|----------------------|------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|---|
| | DMGD frente PL01 (ps/km) | DMGD frente PL01 (ps/km) | DMGD frente PL01 (ps/km) | DMGD frente PL01 (ps/km) |
| PL01 | / | / | / | / |
| PL11 | -88,8 | -118,7 | 94,4 | -90,9 |
| PL21 | -131,5 | -190,7 | 233,4 | -135,4 |
| PL02 | -112,3 | -171,2 | 251,7 | -116,0 |
| PL12 | -133,6 | -221,5 | 411,6 | -139,0 |
| PL31 | -142,9 | -231,2 | 403,3 | -148,5 |
| PL03 | -83,8 | -199,8 | 638,7 | -90,5 |
| PL22 | -104,8 | 221,2 | 619,2 | -111,6 |
| PL41 | -121,8 | -239,1 | 604,9 | -129,0 |
| PL13 | -34,2 | -176,4 | 854,4 | -42,0 |
| PL32 | -43,8 | -187,4 | 852,3 | -51,9 |
| PL51 | -67,9 | -213,5 | 837,5 | -76,5 |
| PL04 | -106,8 | -270,8 | 922,4 | -115,2 |
| PL23 | -80,2 | -245,7 | 957,3 | -88,9 |
| PL42 | -8,2 | -177,3 | 1049,5 | 17,4 |
| PL61 | 9,8 | -163,6 | 1090,3 | -0,1 |
| MaxIDMGDI (ps/km) | 152,7 | 270,8 | 1090,3 | 148,5 |

- 5 [0131] La tabla 9 muestra los valores de DMGD y Max |DMGD|, expresados como ps/km, a una longitud de onda $\lambda = 1550$ nm para fibras de pocos modos que soportan 16 modos PL guiados según el ejemplo 8 (ya discutidos en la tabla 1 y la tabla 5). De acuerdo con los resultados que se muestran en la figura 7, el valor óptimo de α para dicha FMF es $\alpha_{opt} = 1,926$. La columna 2 de la tabla 9 muestra los valores de DMGD y Max |DMGD| a una longitud de onda $\lambda = 1550$ nm para una FMF de acuerdo con el ejemplo 8 que muestra un valor óptimo de α . La columna 3 de la tabla 9 muestra los valores de DMGD y Max |DMGD| a una longitud de onda $\lambda = 1550$ nm para una FMF de acuerdo con el ejemplo 8, que mostraría un α ligeramente fuera del objetivo, por ejemplo $\alpha_{fuera-objetivo} = 1,916$.
- 10 [0132] La columna 4 de la tabla 9 proporciona los valores de DMGD y Max |DMGD| a una longitud de onda $\lambda = 1550$ nm para una FMF según el ejemplo 8, que mostraría un valor de α , por ejemplo $\alpha_{comp} = 1,990$, que podría usarse concatenada con la FMF de la columna 3, para construir un enlace óptico compensado en DMGD.
- 15 [0133] La última columna en la tabla 9 da los valores de DMGD y Max |DMGD| a una longitud de onda $\lambda = 1550$ nm para un enlace óptico construido al concatenar la FMF de la columna 3 con una longitud L_{opt} y la FMF de la columna 4 con una longitud L_{comp} . La longitud total del enlace es $L_{link} = L_{opt} + L_{comp}$, donde L_{opt} y L_{comp} son tales que $L_{comp}/L_{opt} = 0,150$.
- 20 [0134] Tal relación se elige igual a, o muy próxima a, la relación entre los valores absolutos de los DMGD de los modos que tienen los valores más altos de DMGD para ambas fibras del enlace. En el ejemplo 7 descrito en la tabla 9, dicho modo más elevado es el modo PL61, para el cual la relación de los valores absolutos de los DMGD para ambas fibras del enlace óptico es $|-163,6/1090,3| = 0,15$. En esta realización, se elige una relación de las longitudes de fibras ópticas que es igual a 0,15, tal que $L_{comp} / L_{opt} = 0,150$. Por lo tanto, se eligen las longitudes L_{opt} y L_{comp} para minimizar Max |DMGD| del enlace óptico.
- 25 [0135] Como se muestra en la tabla 9, los valores de DMGD y Max |DMGD| para el enlace óptico compensado en DMGD están muy próximos a los valores mínimos. Tal enlace óptico permite guiar dieciséis modos PL, con un DGMD muy bajo y, por lo tanto, alcanzar un muy buen sistema.
- 30 [0136] Tal enlace óptico cumple el criterio de núcleo $C < 18$, y está compuesto por dos FMF, que cumplen individualmente el criterio de núcleo $C < 18$.
- 35 [0137] Los ejemplos de enlaces ópticos descritos anteriormente en relación con las tablas 6, 7, 8 y 9 se construyen, por lo tanto, concatenando dos FMF que tienen el mismo perfil de índice de refracción global, de acuerdo con cualquiera de las realizaciones de las figuras 3A a 3C, teniendo los mismos radios R_1 , R_2 y R_3 y diferencias de índice Dn_1 , Dn_2 y Dn_3 , pero con valores ligeramente diferentes de α , uno con un valor α ligeramente inferior al α óptimo, y uno con un valor α ligeramente más alto que el α óptimo, para que los DMGD con signos opuestos se puedan compensar entre sí. De este modo, es posible construir un enlace compensado en DMGD con características robustas.
- 40 [0138] Sin embargo, de acuerdo con otra realización, también es posible concatenar más de dos FMF: siempre y cuando, al menos, dos de ellas guíen al menos un modo con DMGD que muestran signos opuestos, puede producirse una compensación para construir un enlace compensado en DMGD.
- [0139] Además, de acuerdo con otra realización, también es posible concatenar FMF que tengan el mismo valor para α , pero teniendo diferentes valores de R_1 o de Dn_1 por ejemplo. La misma compensación en DMGD puede producirse, eligiendo las longitudes de fibra óptica adecuadas.
- [0140] También es posible, de acuerdo con otra realización, asociar fibras de pocos modos que muestran diferentes perfiles de índice de refracción, tales como, como un mero ejemplo, combinando una fibra de pocos modos de

acuerdo con el ejemplo 1 con una fibra de pocos modos de acuerdo con el ejemplo 3, o incluso combinando una FMF de acuerdo con el ejemplo 8 con una FMF de acuerdo con el ejemplo 10.

[0141] Más generalmente, es posible asociar las FMF que tengan cualquiera de los perfiles de índice de refracción de las figuras 3A a 3C. También es posible asociar una o varias FMF que tengan uno de los perfiles de índice de refracción de las figuras 3A a 3C, con cualquier otra FMF que tenga un núcleo óptico con un perfil de índice gradual α único y un revestimiento óptico que comprenda una zanja.

[0142] También es posible asociar en un enlace óptico varias fibras ópticas, que satisfagan individualmente los criterios $R_{1i} \geq 13,5 \mu\text{m}$ y $C \leq 18$, o que no satisfacen individualmente tales criterios, o para la cual, o varias de ellas solo, satisfagan individualmente tales criterios.

[0143] Siempre que las longitudes apropiadas de fibras ópticas se elijan cuidadosamente, de modo que el enlace

$$C = 10 \cdot \frac{\text{Max}|DMGD_{link}|}{(R_{1link}^2 \cdot Dn_{1link})^3} \leq 18,$$

óptico cumpla el criterio

cualquier asociación de cualquier número de cualquier

tipo de FMF es posible construir un enlace óptico compensado en DMGD.

[0144] Las figuras 8A y 8B ilustran realizaciones de un sistema óptico de acuerdo con la invención. De acuerdo con la primera realización en la figura 8A, dicho sistema óptico comprende transceptores 81 y receptores 85 conectados ópticamente por un enlace de fibra óptica 70 que incluye, al menos, dos tramos 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, realiza el multiplexado de 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.

[0145] El demultiplexor de modo 83, realiza el demultiplexado de los n modos PL multiplexados, y alimenta cada modo PL a un amplificador 84. Los modos PL se introducen en los receptores 85 a través de la salida de los amplificadores 84.

[0146] Tal sistema óptico puede comprender M enlaces ópticos. En un ejemplo, $M = 1$; en otro ejemplo, $M = 2$; en otro ejemplo $M = 5$; en otro ejemplo más, $M = 10$. En caso que el sistema óptico comprenda M enlaces ópticos, también comprenderá multiplexores de modo M 82, demultiplexores de modo M 83, y amplificadores M 84 para cada modo PL guiado por el sistema óptico.

[0147] La realización en la figura 8B difiere de la primera realización en la figura 8A en que el amplificador 84 amplifica todos los modos PL guiados por el enlace óptico 70; como tal, el amplificador 84 está ópticamente conectado 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, también comprende M amplificadores 84; sin embargo, solo hay un multiplexor de modo 82, ópticamente conectado entre transceptores 81 un enlace óptico 70, y solo un demultiplexor de modo 83, ópticamente conectado entre el amplificador 84 y los receptores 85.

[0148] Las realizaciones de las figuras 8A y 8B se dan como meros ejemplos, y un enlace óptico de acuerdo con la invención puede usarse, por supuesto, en cualquier otro tipo de sistema óptico.

REIVINDICACIONES

1. Enlace óptico que comprende N fibras ópticas, con $N \geq 2$, siendo N un número entero, comprendiendo cada fibra óptica un núcleo óptico y un revestimiento óptico que rodea el núcleo óptico, teniendo el núcleo óptico un perfil de índice gradual con α_i simple, con $\alpha_i \geq 1$, siendo α_i un parámetro adimensional que define la forma del perfil de índice del núcleo óptico, y teniendo el núcleo óptico un radio R_{1i} y un índice de refracción máximo n_{0i} , donde $i \in \{[1; N]\}$ es un índice que designa dicha fibra óptica, teniendo dicho revestimiento óptico en su borde exterior un índice de refracción n_{Cli} , en el que dicho revestimiento óptico comprende una región de índice de refracción deprimido $n_{trenchi}$, denominada zanja, que rodea el núcleo óptico, teniendo dicha zanja un radio interior R_{2i} , con $R_{2i} \geq R_{1i}$, y un radio exterior R_{3i} , con $R_{3i} > R_{2i}$, estando caracterizado dicho enlace óptico porque un radio del núcleo óptico promedio R_1 de enlace para dicho enlace óptico, expresado en micrómetros, satisface un criterio C de calidad de comunicaciones ópticas definido por la siguiente ecuación:

$$C = 10 \cdot \frac{\text{Max}|DMGD_{link}|}{(R_{1link}^2 \cdot Dn_{1link})^3}$$

donde DMGDlink es el retardo de grupo de modo diferencial entre dos modos guiados por dicho enlace óptico, donde $\text{Max}|DMGD_{link}|$, es el valor máximo absoluto del retardo de grupo de modo diferencial entre cualquier combinación de modos guiados en dicho enlace óptico, expresado en ps/km,

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

y donde $Dn_{1link} = \frac{\sum_{i=1}^N Dn_{1i} L_i}{\sum_{i=1}^N L_i}$ siendo $Dn_{1i} = n_{0i} - n_{Cli}$, la diferencia de índice de refracción núcleo-revestimiento para la fibra i , 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, y por que, para al menos una fibra óptica i de dicho enlace, dicho radio del núcleo óptico R_{1i} se elige de modo que $R_{1i} \geq 13,5 \mu\text{m}$ y para todas las fibras ópticas $i \in \{[1; N]\}$ de dicho enlace, dicha longitud L_i se elige de manera que $C \leq 18$, y porque dicho enlace óptico guía, al menos, 4 modos PL.

2. Enlace óptico según la reivindicación 1, en el que, al menos, una de dichas fibras ópticas tiene parámetros de zanja que satisfacen la siguiente relación:

$$55 \leq 1000 \cdot |(R_{3i} - R_{2i}) \cdot Dn_{3i} \cdot (R_{1i}^2 \cdot Dn_{1i})| \leq 150$$

donde $Dn_{3i} = n_{trenchi} - n_{Cli}$ es la diferencia de índice de refracción revestimiento-zanja en $\lambda = \lambda_c$, y donde los radios R_{1i} , R_{2i} y R_{3i} se expresan en micrómetros.

3. Enlace óptico según la reivindicación 2, en el que $Dn_3 \leq -3 \cdot 10^{-3}$.

4. Enlace óptico según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que al menos una de dichas fibras ópticas tiene un radio de núcleo óptico R_{1i} y un valor α_i de dicho perfil de índice gradual de manera que:

$$C = 10 \cdot \frac{\text{Max}|DMGD_i|}{(R_{1i}^2 \cdot Dn_{1i})^3} \leq 18$$

donde $\text{Max}|DMGD_i|$ es el valor máximo absoluto de DMGD entre cualquier combinación de modos guiados en dicha fibra óptica, expresado en ps/km, y donde $Dn_{1i} = n_{0i} - n_{Cli}$ es la diferencia de índice de revestimiento-núcleo para $\lambda = \lambda_c$ para dicha fibra óptica.

5. Enlace óptico según la reivindicación 4, en el que dicha fibra óptica es tal que $R_{1i} \leq 20 \mu\text{m}$.

6. Enlace óptico según cualquiera de las reivindicaciones 1, 4 y 5, en la que se guían de 4 a 16 modos PL.

7. Enlace óptico según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en la que se guían, al menos, 6 modos PL, y preferiblemente de 6 a 16 modos PL.

8. Enlace óptico según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en el que para todas las fibras ópticas $i \in \{[1; N]\}$ de dicho enlace, dichas longitudes L_i se eligen para minimizar $\text{Max}|DMGD|$ en dicho enlace.

9. Enlace óptico según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, donde al menos dos fibras ópticas en dicho enlace tienen un $DMGD_i$ que muestra signos opuestos para, al menos, un modo guiado por dichas fibras ópticas, siendo $DMGD_i$ el retardo de grupo de modos diferencial entre dicho modo y uno cualquier otro modo guiado en fibra óptica i .
- 5 10. Enlace óptico según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, en el que, para al menos una de dichas fibras $i \in \{1; N\}$ de dicho enlace óptico, dicho núcleo óptico tiene un índice de refracción mínimo $n_{1i} = n_{cli}$, y dicho revestimiento óptico también comprende una capa de revestimiento interior que rodea directamente dicho núcleo óptico, con un radio interior R_{1i} y un radio exterior $R_{2i} \geq R_{1i}$, teniendo dicha capa interior de revestimiento un índice de refracción constante n_{2i} , tal que $n_{2i} \neq n_{cli}$ y $n_{2i} > n_{trenchi}$.
- 10 11. Enlace óptico según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, en el que, para al menos una de dichas fibras $i \in \{1; N\}$ de dicho enlace óptico, dicho núcleo óptico tiene un índice de refracción mínimo $n_{1i} \neq n_{cli}$, y dicho revestimiento óptico también comprende una capa de revestimiento interior que rodea directamente dicho núcleo óptico, con un radio interno R_{1i} y un radio exterior $R_{2i} \geq R_{1i}$, teniendo dicha capa de revestimiento interno un índice de refracción constante n_{2i} , tal que $n_{2i} = n_{1i}$ y $n_{2i} > n_{trenchi}$.
- 15 12. Enlace óptico según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, en el que, para al menos una de dichas fibras $i \in \{1; N\}$ de dicho enlace óptico, dicho núcleo óptico tiene un índice de refracción mínimo que es igual a n_{cli} , comprendiendo también dicho revestimiento óptico una capa de revestimiento interior que rodea directamente dicho núcleo óptico, con un radio interior R_{1i} y un radio exterior $R_{2i} \geq R_{1i}$, siendo dicha capa de revestimiento interior una extensión de dicho perfil de índice gradual α sencillo de dicho núcleo óptico, y teniendo dicha capa interior un índice de refracción mínimo $n_{1i} = n_{trenchi}$.
- 20 13. Sistema óptico que comprende al menos un enlace óptico según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12.
- 25

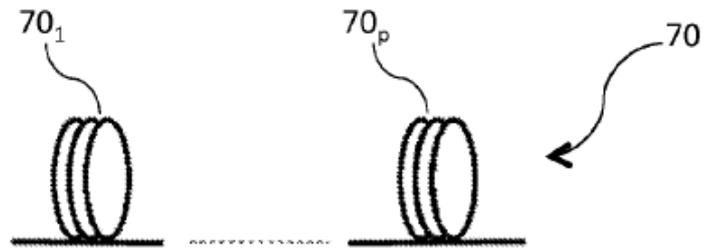


Figura 1

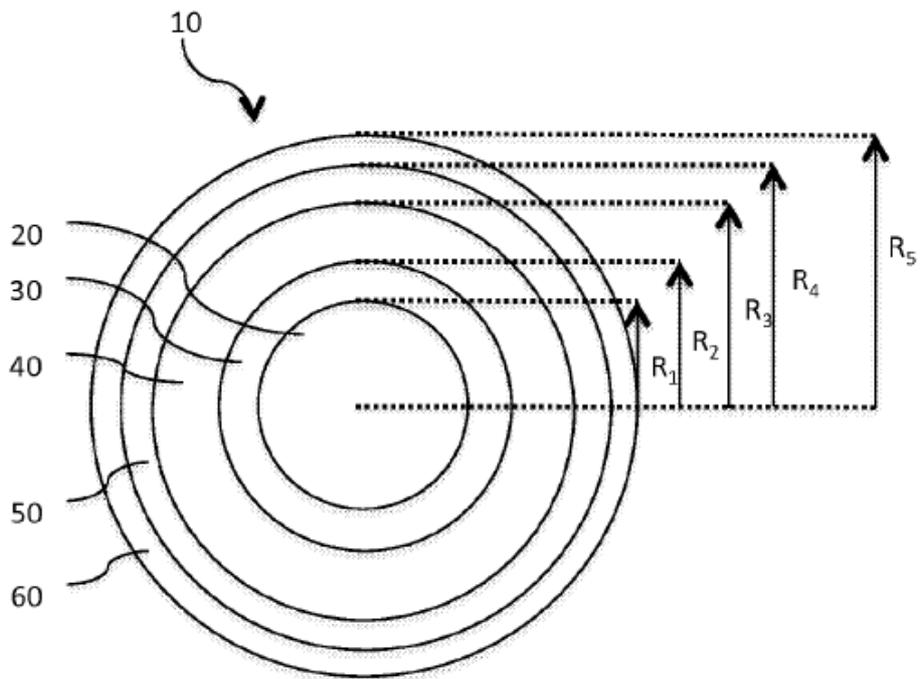


Figura 2

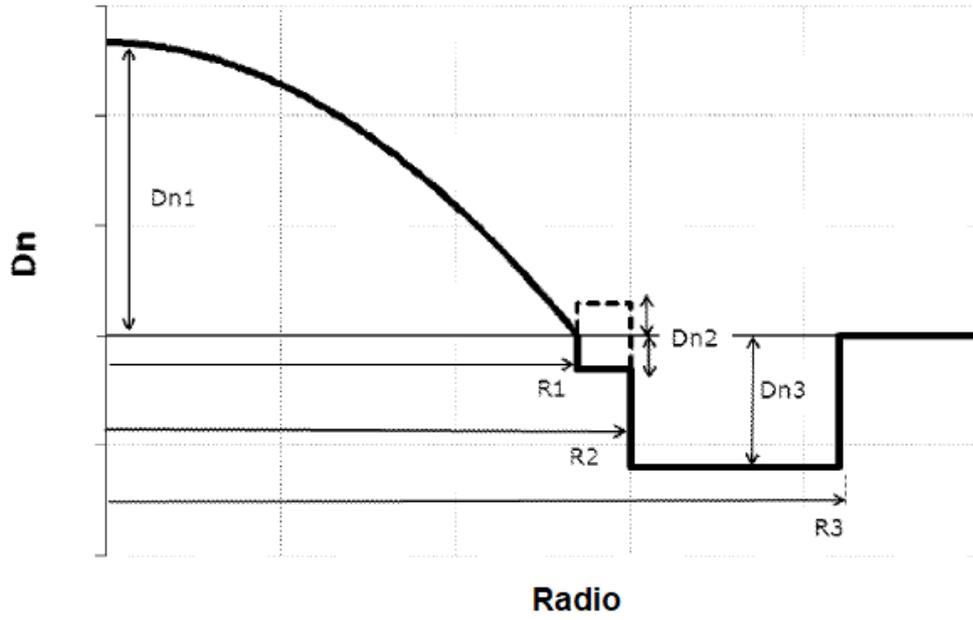


Fig. 3A

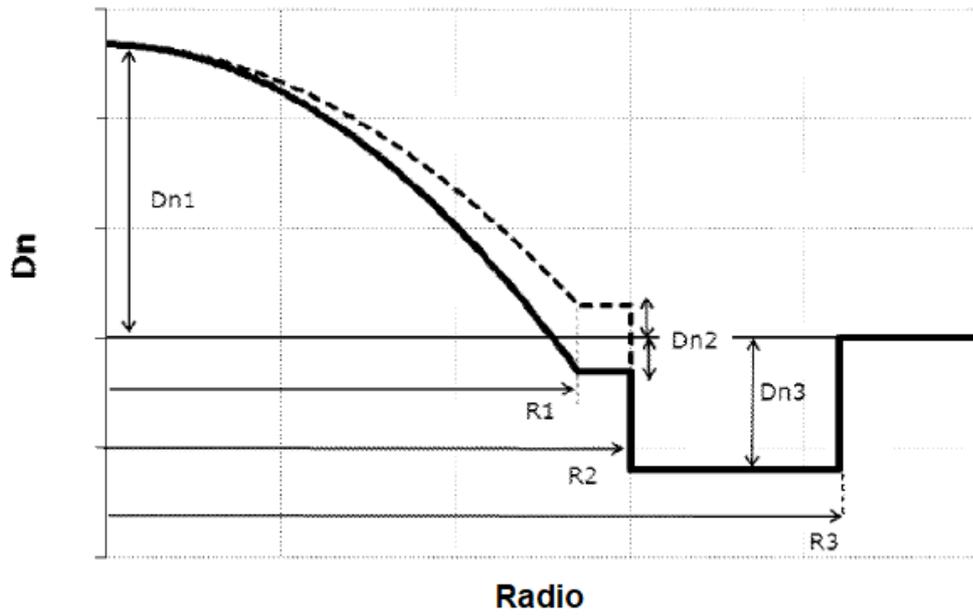


Fig. 3B

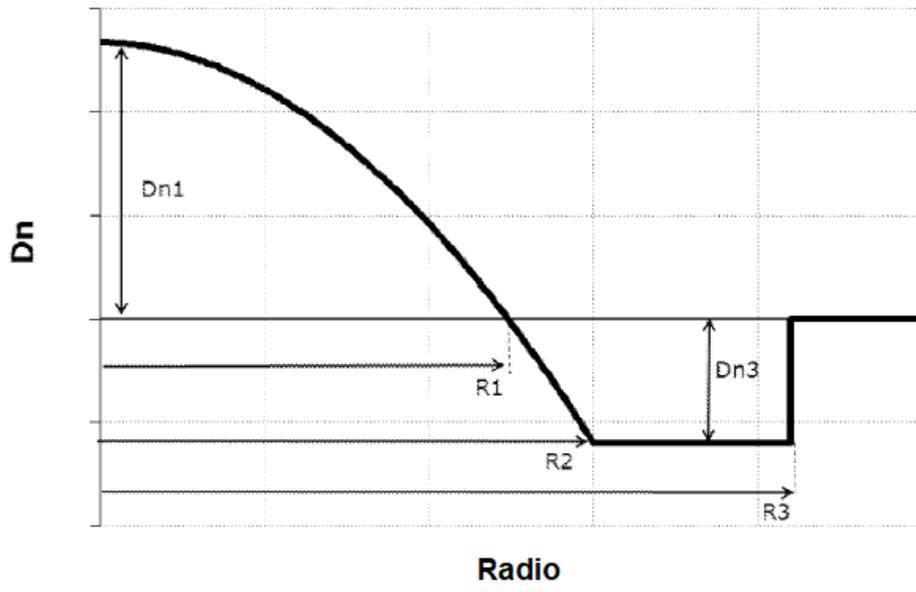


Fig. 3C

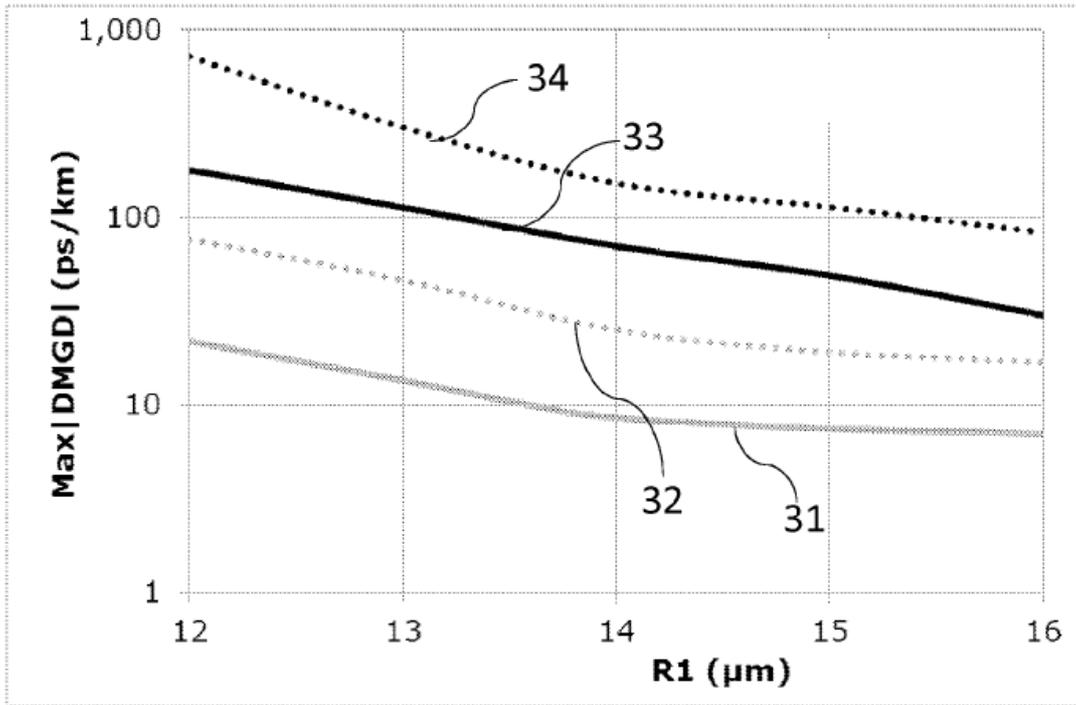


Fig. 4

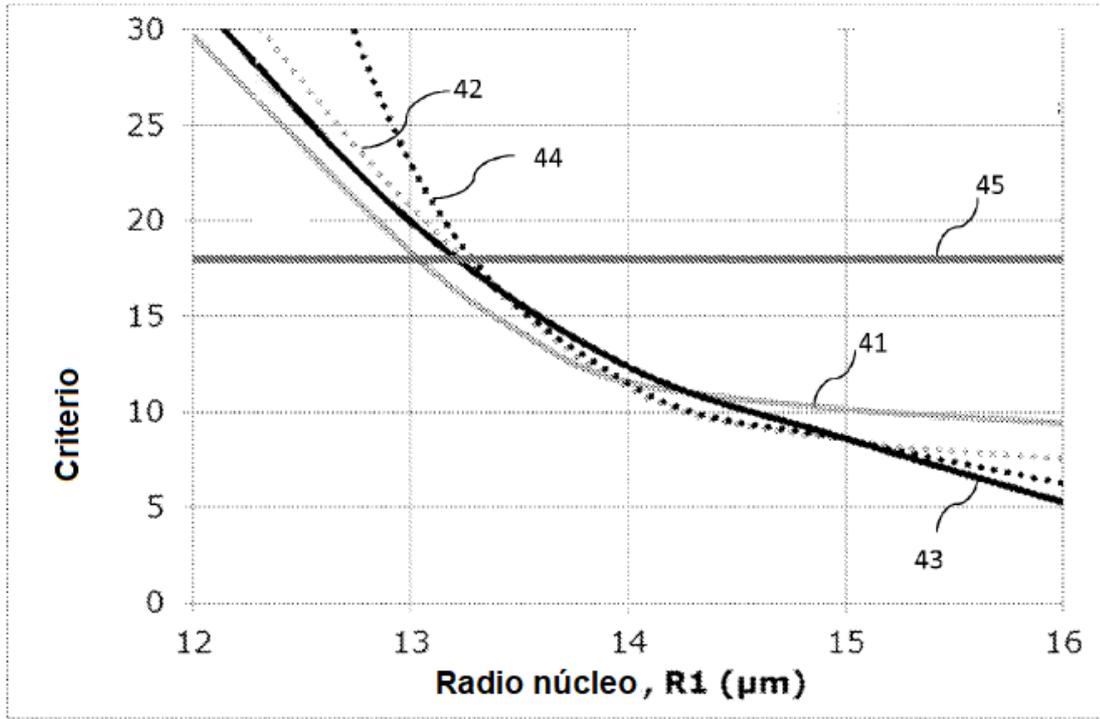


Fig. 5

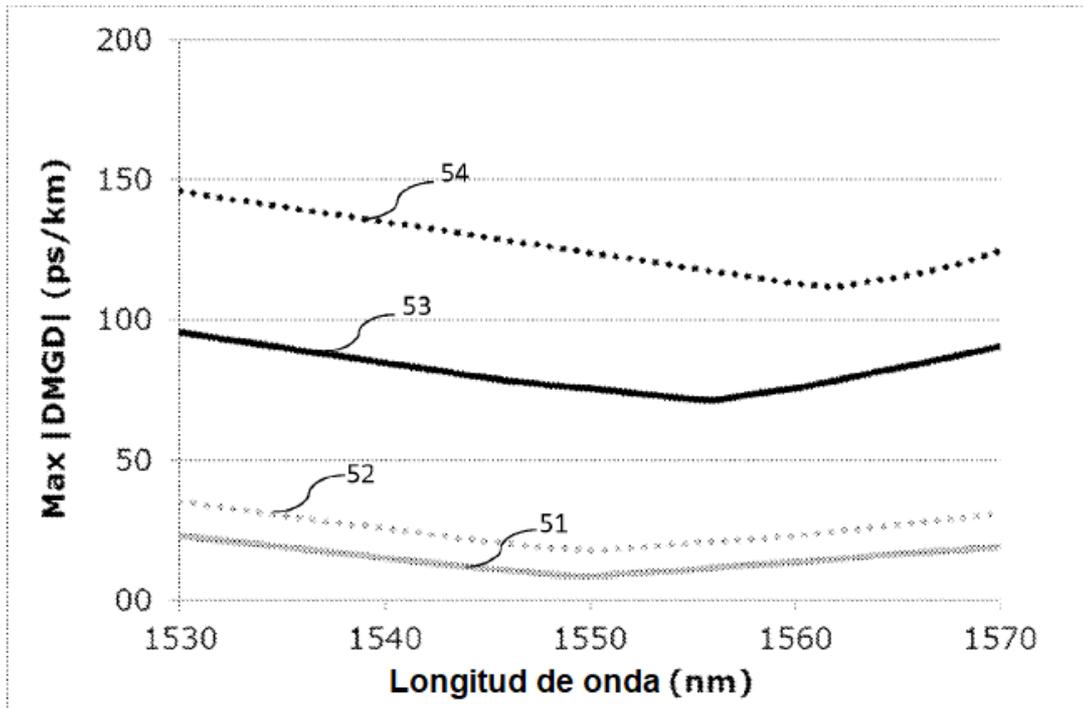


Fig. 6

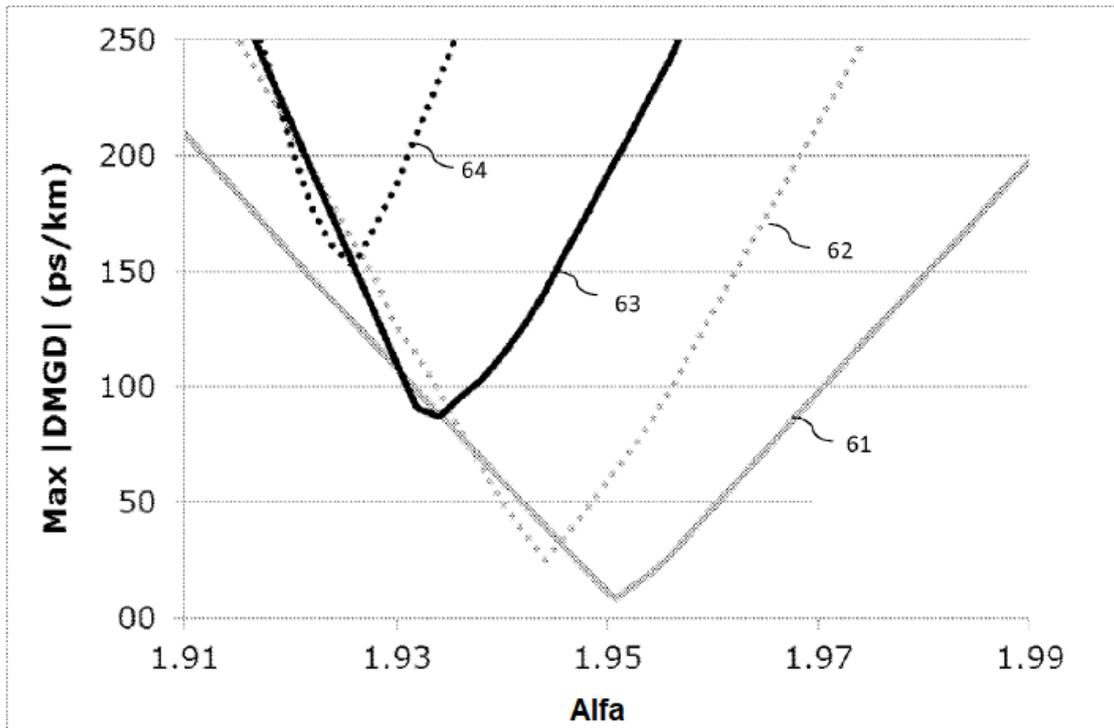


Fig. 7

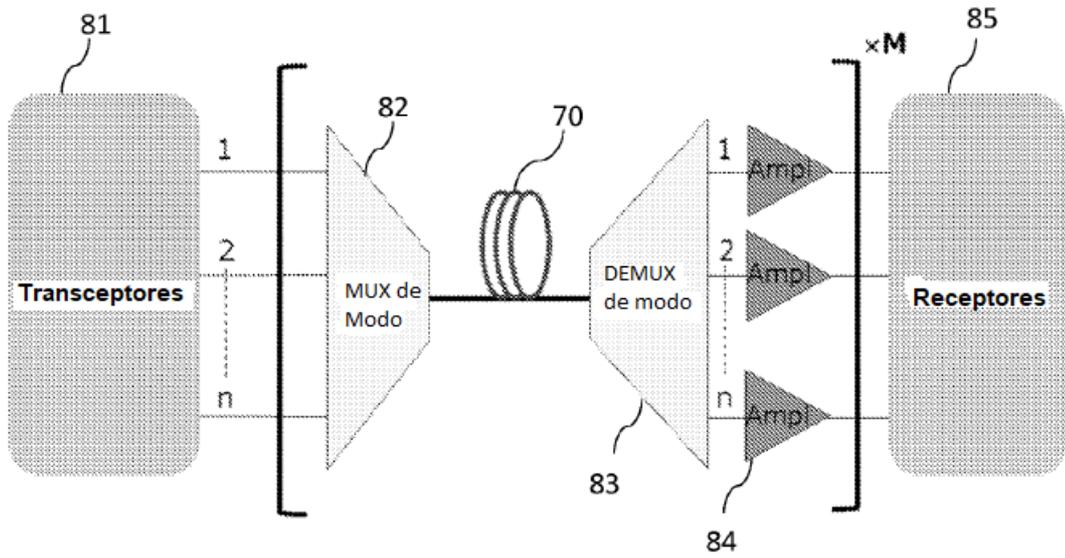


Fig. 8A

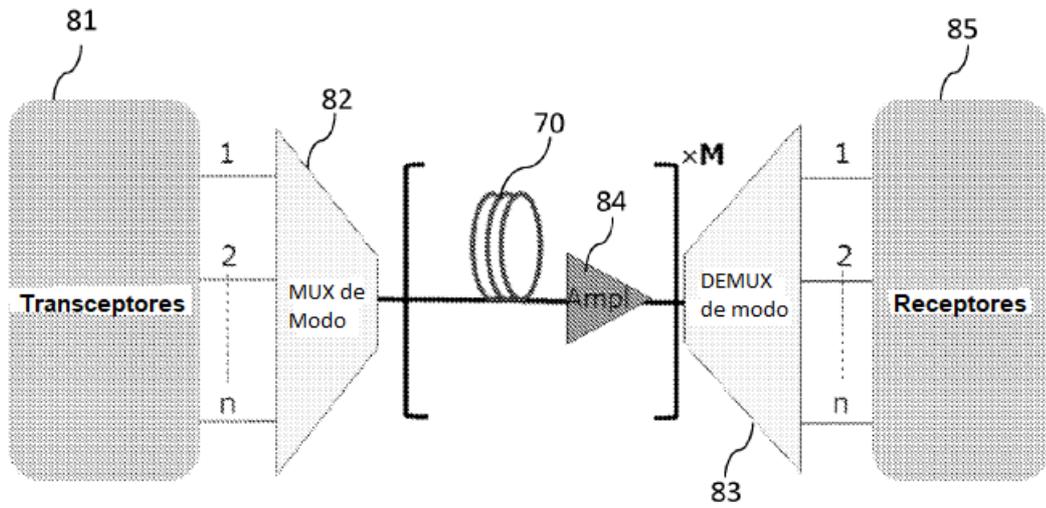


Fig. 8B

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 A [0007]
- US 20130071114 A [0011] [0013] [0027]
- US 2013007115 A [0013]
- WO 2012161809 A [0015]
- US 20120328255 A [0016] [0027]
- WO 2013126254 A [0019]
- US 20130071115 A [0027]

10