



19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 357 483**

51 Int. Cl.:  
**H04B 10/18** (2006.01)  
**H04B 10/17** (2006.01)  
**H01S 3/30** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **01962963 .3**  
96 Fecha de presentación : **22.08.2001**  
97 Número de publicación de la solicitud: **1314268**  
97 Fecha de publicación de la solicitud: **28.05.2003**

54 Título: **Enlace de transmisión óptica con fibra amplificada Raman de baja pendiente.**

30 Prioridad: **31.08.2000 EP 00118885**  
**07.09.2000 US 230796 P**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**26.04.2011**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**26.04.2011**

73 Titular/es: **PRYSMIAN S.p.A.**  
**Viale Sarca 222**  
**20126 Milano, IT**

72 Inventor/es: **Tirloni, Bartolomeo, Italo y**  
**Roba, Giacomo, Stefano**

74 Agente: **Ponti Sales, Adelaida**

**ES 2 357 483 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

Enlace de transmisión óptica con fibra amplificada raman de baja pendiente

5 Antecedentes de la invención

10 [0001] La presente invención se refiere en general a un enlace de fibra óptica que permite la transmisión de señales ópticas multiplexadas por división de longitud de onda densa a través de una banda ancha sin una degradación significativa de los efectos no lineales, mientras que también permite la amplificación Raman en el enlace. Más particularmente, la presente invención se refiere a una fibra óptica que tiene una baja área efectiva, con dispersión no cero, y una baja pendiente de dispersión para realizar la amplificación Raman después de una fibra de alta área efectiva.

15 [0002] Se están buscando continuamente sistemas de transmisión óptica que comunicarán señales multiplexadas por división de longitud de onda en distancias más largas (varios miles de kilómetros) sin amplificación o regeneración, o con una amplificación o regeneración limitadas en la medida de lo posible, y se encargará de anchos de banda mayores. La banda de amplificación actual para sistemas ópticos es generalmente de aproximadamente 30 nm de ancho en la llamada banda C de 1550 nm aproximadamente, pero los desarrollos están expandiendo esta banda a aproximadamente 70 nm e incluyen la llamada banda L de amplificación de aproximadamente 1580 nm.

20 [0003] Los efectos ópticos no lineales se sabe que degradan la calidad de la transmisión a lo largo de la fibra óptica de transmisión estándar en determinadas circunstancias. Estos efectos no lineales, que incluyen la mezcla de cuatro ondas, la modulación de auto-fase y dispersión Raman y Brillouin, y modulación de fase cruzada, inducen distorsiones en la señal transmitida en sistemas de alta potencia, lo que degrada la calidad de la transmisión. En particular, los efectos no lineales pueden perjudicar la calidad de la transmisión usando multiplexado por división de longitud de onda (WDM), que de otro modo aumenta considerablemente la capacidad de transportar la señal de las fibras ópticas de transmisión mediante el aumento del número de canales de transmisión a través de los cuales se pueden enviar las señales.

25 [0004] Estos efectos no lineales, particularmente el fenómeno de mezcla de cuatro ondas (FWM), pueden minimizarse o evitarse utilizando fibras de transmisión de modo simple que tienen un área efectiva grande y un valor absoluto de la dispersión local que es mayor que cero alrededor de las longitudes de onda operativas. En los sistemas avanzados de WDM, tales como sistemas de multiplexado por división de longitud de onda densa (DWDM) (distancia  $\leq 0,8$  nm) y multiplexado por división de longitud de onda hiper-densa (HDWDM) (distancia  $\leq 0,4$  nm), donde los canales de transmisión están estrechamente empaquetados juntos, el valor de la dispersión local debe tener un valor mínimo para mantener la calidad de las señales. Por otro lado, si el valor de la dispersión de la fibra se vuelve demasiado grande, las señales se distorsionan durante la transmisión, a menos que se incluyan dispositivos de corrección de la dispersión en la línea de transmisión. Así, para que una fibra óptica sea efectiva en un sistema WDM, la fibra debe tener una dispersión mínima, pero el valor de la dispersión también debe ser inferior a un valor máximo.

30 [0005] En general, el aumento del área efectiva y el mantenimiento de las pérdidas bajas y un buen comportamiento de la pérdida de macrocurvatura/microcurvatura produce un aumento de la pendiente de dispersión. A medida que el ancho de banda de las comunicaciones WDM se amplía, sin embargo, una pendiente de dispersión plana se hace cada vez más importante para evitar la variación de la dispersión entre los canales. En particular, la combinación de una pendiente de alta dispersión, banda WDM ancha, y larga distancia ofrece grandes diferencias de dispersión acumulada de las longitudes de onda laterales de la banda WDM. Incluso en la presencia de compensación de dispersión exacta en una posición particular de la banda WDM (por ejemplo, el canal central), los canales apartados de esa posición en particular (por ejemplo, los canales laterales) acumularán grandes cantidades de dispersión cromática. La interacción entre la dispersión y los efectos no lineales deteriora estas señales periféricas de tal manera que evita que el receptor las recupere, incluso en presencia de una compensación previa óptima canal por canal en el lado del transmisor y/o después de la compensación en el lado del receptor. En consecuencia, una baja pendiente de dispersión a través de un ancho de banda operativo es importante para la transmisión eficaz de los canales WDM en las bandas C y L.

35 [0006] Se conocen fibras que tienen una baja pendiente de dispersión. Por ejemplo, la patente US N° 5.553.185 de Antos et al. describe una fibra de dispersión no cero que se caracteriza por una serie de regiones centrales que tienen diferentes perfiles y anchos del índice de refracción. La forma de los perfiles de índice de refracción, en términos de la diferencia del índice de refracción y del radio, de cada región se puede ajustar para tener propiedades a medida para un sistema de telecomunicaciones de alto rendimiento. En particular, una de las regiones tiene una diferencia de índice de refracción deprimida. La pendiente de dispersión de la fibra descrita es menor de 0,05 ps/nm<sup>2</sup>/km y el valor absoluto de la dispersión total está entre 0,5 y 3,5 ps/nm/km en el rango de transmisión preseleccionado, que abarca aproximadamente 1.490-1.575 nm. Además, la longitud de onda de dispersión cero es

de aproximadamente 1593 nm, que está fuera del rango de transmisión preseleccionado.

5 **[0007]** Otra fibra para un sistema de comunicación de alto rendimiento se describe en Y. Akasaka et al., "Enlargement of Effective Core Area on Dispersión-Flattened Fiber and Its Low Non-Linearity", OFC'98 Technical Digest, páginas 302-304. Esta fibra también se caracteriza por una serie de regiones centrales que tienen diferencias de índices de refracción y radios que varían. Una de las regiones centrales también tiene una diferencia del índice de refracción deprimido. La fibra descrita tiene una pendiente de dispersión menor que la fibra de modo simple estándar en la ventana de transmisión.

10 **[0008]** La patente EP 0 877 496 se refiere a una línea de transmisión óptica adecuada para la transmisión a larga distancia y la transmisión de gran capacidad de luz de señal. La patente EP 0 877 496 describe una línea de transmisión óptica que comprende una primera fibra óptica que tiene una primera área efectiva y una primera pendiente de dispersión en 1550 nm y una segunda fibra óptica, ópticamente conectada a la primera fibra óptica, que tiene en 1550 nm una segunda área efectiva menor que la primera área efectiva y una segunda pendiente de dispersión menor que la primera pendiente de dispersión.

15 **[0009]** La patente 5 905 838 describe una fibra basada en sílice, denominada "MetroWaveFiber" (MWF), que permite la operación de una ventana de doble (1310 y 1550 nm) WDM en sistemas de distancias cortas y medias, por ejemplo, en sistemas metropolitanos.

20 **[0010]** La patente 5 838 867 describe una fibra de compensación de dispersión para sistemas de comunicaciones ópticas de larga distancia y de alta tasa de bits. La fibra de compensación de la dispersión tiene, en 1550 nm, una dispersión cromática en el rango de -40 a 0 ps/Km/nm, un pendiente de dispersión en el rango de -0,5 a -0,1 ps/Km/nm<sup>2</sup>, una pérdida de transmisión no mayor de 0,5 dB/Km y un diámetro del campo modal en el rango de 4,5 a 6,6 μm. La patente 5 838 867 indica que la luz de señal puede amplificarse mediante efecto Raman en la fibra de compensación de la dispersión.

25 **[0011]** Se puede usar amplificación Raman distribuida en la línea de transmisión, por ejemplo, para aumentar la distancia de transmisión entre los amplificadores dopados con erbio-, y/o reducir la pérdida de separación que resultaría de un aumento en el número de canales WDM o una disminución en la potencia y la reducción de costes de los amplificadores dopados con erbio. La dispersión Raman estimulada es un proceso no lineal que puede causar que una fibra óptica amplifique una señal óptica. La dispersión Raman convierte una pequeña fracción de la potencia incidente desde un rayo óptico bombeado a otro rayo óptico a una frecuencia rebajada en una cantidad determinada mediante los modos vibratorios de la media. La configuración habitual del amplificador Raman distribuido utiliza la línea de transmisión como el medio en donde una bomba, que típicamente va en contra de la propagación, provoca una dispersión Raman estimulada en la longitud de onda de la señal. Dos "ecuaciones de índice" gobiernan la dinámica de las potencias de la señal (P<sub>S</sub>) y de la bomba (P<sub>P</sub>) en la fibra óptica en el caso de una bomba contraria a la propagación:

40 
$$\frac{dP_S}{dz} = \frac{g_R}{a_p} P_p P_S - \alpha_S P_S \quad (1)$$

$$\frac{dP_P}{dz} = \frac{\omega_P}{\omega_S} \frac{g_R}{a_S} P_p P_S + \alpha_P P_P \quad (2)$$

45 donde α<sub>S</sub> y α<sub>P</sub> son los coeficientes de atenuación de la fibra óptica en la señal y la longitud de onda de la bomba, respectivamente, ω<sub>S</sub> y ω<sub>P</sub> son frecuencias ópticas de la longitud de onda de la señal y la bomba, respectivamente, a<sub>S</sub> y a<sub>P</sub> son las áreas centrales efectivas de la longitud de onda de la fibra óptica en la señal y la bomba, respectivamente, y g<sub>R</sub> es el coeficiente de ganancia Raman del material de fibra de un par determinado de frecuencias ópticas. Ver Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics", 2ª edición, cap. 8 (1995).

50 **[0012]** En general, la amplificación Raman distribuida opera en un régimen no saturado, en donde los niveles de potencia de la señal se mantienen muy por debajo de los niveles de potencia de la bomba. Bajo este supuesto, uno puede pasar por alto el agotamiento de la bomba, es decir, el primer término en el lado derecho (2). Así, las ecuaciones (1) y (2) se pueden resolver fácilmente para obtener la potencia de señal:

$$P_S(L) = P_S(0) \exp \left[ \frac{g_R}{a_p} P_p(L) L_{eff} - \alpha_S L \right] \quad (3)$$

Donde  $L$  es la longitud de la fibra media,  $P_S(0)$  es la potencia de la señal de entrada,  $P_P(L)$  es la potencia de la bomba de entrada (propagación contraria) en el extremo opuesto de la fibra y  $L_{eff}$  es la longitud de interacción eficaz en la longitud de onda de la bomba dada por:

$$L_{eff} = \frac{1}{\alpha_p} [1 - \exp(-\alpha_p L)]. \quad (4)$$

**[0013]** Un amplificador Raman se caracteriza en términos de ganancia de amplificador (lineal) o relación ON/OFF, que se define por lo siguiente:

$$G_A(L) = \frac{P_S(L)}{P_S(0) \exp(-\alpha_S L)} = \exp \left[ \frac{g_R}{\alpha_p} P_P(L) L_{eff} \right] \quad (5)$$

Los valores típicos de  $P_P(L)$  varían desde 100 mW hasta 1000 mW y más. Los valores moderados de potencia de la bomba se consideran menores de 500 mW.

**[0014]** A partir de la ecuación (5) se puede determinar que una fibra eficiente en términos de amplificación Raman distribuida tiene las siguientes propiedades:

- área efectiva pequeña (menos de  $45 \mu\text{m}^2$ ) en la longitud de onda de la bomba (normalmente entre unos 1400 nm y 1510 nm aproximadamente, preferentemente entre 1440 nm y 1490 nm) o de manera equivalente un diámetro de modo campo pequeño en la longitud de onda de la bomba; y
- longitud efectiva larga en la longitud de onda de la bomba, que es equivalente, para una longitud fija  $L$  del medio de la fibra, a una baja pérdida  $\alpha_p$  en la longitud de onda de la bomba.

Estas observaciones están también de acuerdo con los resultados experimentales que se muestran en el artículo de Fludger et al., "An analysis of the improvements in OSNR from distributed Raman amplifiers using modem transmission fibers", OFC2000, FF2-1, páginas 100-102 (2000).

**[0015]** A continuación, nos referiremos a una longitud de onda de la bomba de ejemplo de aproximadamente 1450 nm, pero la invención contempla el uso de longitudes de onda de la bomba de aproximadamente 1.350 nm a 1510 nm. En general, una fibra que tiene un área efectiva pequeña en 1450 nm, también exhibe una pequeña área efectiva en la transmisión convencional de bandas C y L. Este requerimiento entra en conflicto con la necesidad de una fibra con una alta área efectiva para evitar los efectos no lineales en las comunicaciones WDM densas.

**[0016]** Además de la baja área efectiva, es bien sabido que otras condiciones importantes deben tenerse en cuenta para lograr una amplificación Raman aceptable. Las más importantes son la doble retrodispersión de la señal amplificada y la retrodispersión simple de la emisión espontánea de la señal de la bomba, tal como se explica en Nissov et al. "Rayleigh crosstalk in long cascades of distributed unsaturated Raman amplifiers", Electronics Letters, vol. 35, nº 12, páginas 997-998 (10 de junio de 1999); Wan et al. "Impact of Double Rayleigh Backscatter Noise on Digital and Analog Fiber Systems", Journal of Lightwave Tech., vol. 14, no. 3, páginas 288 a 297 (marzo de 1996), y Hansen et al., "Rayleigh Scattering Limitations in Distributed Raman Pre-Amplifiers", IEEE Photonics Tech. Letters, vol. 10, nº 1, páginas 159 a 161 (enero 1998).

**[0017]** En general, cuando un sistema utiliza amplificación Raman distribuida, hay un valor óptimo de la potencia de la bomba por encima del cual el rendimiento se degrada por los efectos perjudiciales debidos a la retrodispersión doble y simple, tal como se muestra en Garrett et al., "Field demonstration of distributed Raman amplification with 3.8 dB Q-improvement for 5x120 km transmission", OFC2000, PD42-1 a PD42-3 (2000).

**[0018]** En conclusión, una fibra adecuada para un sistema que tiene amplificación Raman distribuida se caracteriza por:

- área efectiva pequeña en la longitud de onda de la bomba, para tener una alta eficiencia de ganancia Raman;
- pequeña pérdida en la longitud de onda de la bomba, para aumentar la longitud de la interacción entre la bomba y la señal;
- pequeña pérdida en la longitud de onda de la señal, de acuerdo con la Ecuación (3);
- baja retrodispersión en la longitud de onda de la señal, para reducir el ruido, y
- rendimiento de modo simple en la longitud de onda de la bomba cuando está en forma de cable,

para limitar la potencia de la bomba en el núcleo de la fibra.

**[0019]** La pérdida de la fibra es la suma de diferentes mecanismos de atenuación (tal como la absorción de infrarrojos, la absorción de OH, la absorción de UV), entre los cuales operan un papel importante en función de la longitud de onda la dispersión de Rayleigh y otros mecanismos de dispersión. La retrodispersión es la combinación de un proceso de dispersión elástica a lo largo de la fibra (típicamente, aunque no de manera restrictiva, retrodispersión Rayleigh) y el mecanismo de recaptura de la luz en la dirección hacia atrás. En general, para las fibras de transmisión común, una pérdida alta implica una retrodispersión alta, porque el término dominante de la pérdida es la dispersión elástica de la luz.

**[0020]** Unas pocas publicaciones están dirigidas a una combinación de fibras ópticas en un enlace de transmisión que incluye la amplificación Raman. El documento WO99/57822, por ejemplo, describe una fibra óptica de dispersión gestionada unitaria que tiene una dispersión total que cambia de positivo a negativo a lo largo de la longitud de la fibra en un rango de longitud de onda de transmisión. La fibra puede incluir amplificación distribuida mediante emisión estimulada de un dopante de tierras raras, efectos Raman, o por ambos. Una realización en el documento WO99/57822 contempla secciones más cortas de la fibra unitaria que tienen mayor pérdida, especialmente cuando las secciones más cortas están codopadas con alúmina y tienen una efectiva área más pequeña para mejor superposición de la luz de la bomba/erbio. En esta realización, las secciones más largas se diseñarán para tener una menor pérdida y un área efectiva mayor. En una realización preferida, las secciones que tienen dispersión negativa también tienen pendiente de dispersión negativa. Los solicitantes han observado que este último generalmente causa una pérdida alta debido al alto contenido de dopante de flúor.

**[0021]** El documento WO99/66607 describe un aparato y un procedimiento para la combinación de amplificación óptica y la compensación de dispersión en un amplificador Raman. Un dispositivo llamado amplificador Raman de gestión de la dispersión (DMRA) combina la amplificación Raman y tiene su longitud y dispersión seleccionadas para equilibrar la dispersión de un enlace. Se utiliza como compensador de dispersión que tiene como objetivo reducir la dispersión total a cero, el DMRA tiene una dispersión muy negativa y una baja área efectiva, lo que permite la amplificación Raman.

**[0022]** La patente US No. 5.191.631 describe una fibra óptica híbrida que tiene una característica de dispersión de fibra deseable y una área efectiva relativamente grande. Las fibras híbridas se construyen mediante empalme juntas de una fibra con una gran área efectiva, pero características de dispersión de fibra típicamente insatisfactorias y una fibra que tiene excelentes características de dispersión, pero un área efectiva más pequeña. La patente, sin embargo, no contempla tener amplificación Raman distribuida a través de la segunda fibra, que tiene una pendiente de dispersión baja en la segunda fibra, o la obtención de una pendiente de dispersión baja a través del enlace para aplicaciones WDM.

**[0023]** Los solicitantes han observado la necesidad de un enlace de transmisión óptica que permite la transmisión de canales WDM densos a través de una banda de longitud de onda que incluye la banda C, y también puede incluir la banda L, sin FWM destructiva y que incluye la amplificación distribuida en la línea.

#### **Descripción de la invención**

**[0024]** Los solicitantes han observado que un enlace de fibra óptica que tiene una primera fibra óptica de dispersión no cero de un área efectiva alta, acoplada directamente antes de una segunda fibra óptica que tiene un área efectiva baja, dispersión no cero, y un valor absoluto bajo de pendiente de dispersión permite una amplificación Raman eficiente a través de la fibra óptica posterior y la transmisión de canales WDM densos e hiper-densos sin una mezcla significativa de cuatro ondas y otros efectos no lineales perjudiciales en una banda ancha.

**[0025]** Los solicitantes también han observado que este enlace óptico puede alcanzar amplificación Raman a través del bombeo de la fibra posterior, tanto co-direccionalmente como contra-direccionalmente a una señal óptica sin degradación significativa de la señal a partir de retrodispersión simple o doble.

**[0026]** En un aspecto, la invención se refiere a un enlace de transmisión de fibra óptica según la reivindicación 1, que incluye una primera fibra óptica que tiene un primera área efectiva en 1550 nm superior a  $45 \mu\text{m}^2$ , y una segunda fibra acoplada posteriormente desde la primera de fibra óptica. La segunda fibra tiene una segunda área efectiva menor que la primera fibra óptica, un valor absoluto de dispersión entre aproximadamente 2 y 20 ps/nm/km en 1550 nm, un valor absoluto de pendiente de dispersión menor de aproximadamente 0,040 ps/nm<sup>2</sup>/km en 1550 nm, y un coeficiente de atenuación en 1550 nm de menos de aproximadamente 0,24 dB/km y en 1450 nm de menos de aproximadamente 0,30 dB/km. Además la fibra ventajosamente muestra un corte cuando está en forma de cable inferior o igual a 1450 nm. La primera fibra óptica puede ser de una fibra estándar de modo simple, una fibra de dispersión positiva no cero, o una fibra de dispersión negativa no cero.

**[0027]** Preferiblemente, la dispersión de la segunda fibra óptica en 1550 nm es entre -2 y -20 ps/km/nm, más

preferiblemente entre -3 y -8 ps/km/nm. Preferiblemente, la dispersión de la segunda fibra óptica en 1625 nm es menor o igual a aproximadamente -0,1 ps/km/nm. Preferiblemente, el valor absoluto de la pendiente de dispersión de la segunda fibra óptica en 1550 nm es menor de aproximadamente 0,035 ps/nm<sup>2</sup>/km, preferiblemente menor de aproximadamente 0,030 ps/nm<sup>2</sup>/km.

5

**[0028]** Preferiblemente, el diámetro del campo modal (MFD) de la segunda fibra óptica en 1550 nm es menor de 7,6 μm, preferiblemente menor de 7,4 μm, aún más preferiblemente menor de 7,2 μm.

10

**[0029]** Preferiblemente, la longitud de onda del cable cortado de la segunda fibra (ITU-T G650 Rec.) es entre 1250 nm y 1450 nm aproximadamente.

15

**[0030]** Preferiblemente, la atenuación de la macrocurvatura de la segunda fibra para un lazo sobre un mandril de 32 mm es menor de aproximadamente 0,5 dB a 1550 nm y menor de aproximadamente 1,0 dB a 1625 nm. Más preferiblemente, la atenuación de macrocurvatura es menor de aproximadamente 0,2 dB a 1550 nm y menor de aproximadamente 0,5 dB a 1625 nm.

20

**[0031]** Preferiblemente, la segunda fibra tiene una sensibilidad de microcurvatura menor de 8 aproximadamente (dB/km)/(g/mm) a 1550 nm y menor de aproximadamente 12 (dB/km)/(g/mm) a 1625 nm. Más preferiblemente, la sensibilidad de microcurvatura a 1550 nm es menor de aproximadamente 6 (dB/km)/(g/mm) a 1550 nm y menor de aproximadamente 10 (dB/km)/(g/mm) a 1625 nm.

**[0032]** Ventajosamente, el área efectiva a 1550 nm de la segunda fibra es inferior a aproximadamente 45 μm<sup>2</sup>.

25

**[0033]** Preferiblemente, la segunda fibra tiene una y solamente una longitud de onda de dispersión cero entre 1200 y 2000 nm.

**[0034]** En un segundo aspecto, la invención se refiere a un procedimiento para transmitir una pluralidad de señales ópticas multiplexadas de división de longitud de onda a través de una larga distancia según la reivindicación 13.

30

**[0035]** En un tercer aspecto, la invención se refiere a una fibra óptica para mejorar la amplificación Raman y la transmisión de longitudes de onda incluyendo la banda C según la reivindicación 14. El núcleo de vidrio tiene un núcleo interno con una primera diferencia del índice de refracción  $\Delta n_1$  de entre aproximadamente 0,008 y 0,014, una primera capa radialmente alrededor del núcleo interno a lo largo de la longitud de la fibra y que tiene una segunda diferencia del índice de refracción  $\Delta n_2$  de entre aproximadamente -0,0005 y -0,0030. La fibra puede tener una segunda capa radialmente alrededor de la primera capa a lo largo de la longitud de la fibra con una tercera diferencia del índice de refracción  $\Delta n_3$  mayor que 0. Además, la fibra puede tener una tercera capa radialmente alrededor de la segunda capa a lo largo de la longitud de la fibra con una cuarta diferencia del índice de refracción  $\Delta n_4$  no superior a 0. El revestimiento de vidrio que rodea el núcleo de vidrio tiene una diferencia del índice de refracción  $\Delta n_{CL}$  substancialmente igual a 0.

40

**[0036]** La fibra óptica según el tercer aspecto de la invención tiene un diámetro de campo modal a 1550 nm menor de aproximadamente 7,6 μm, un coeficiente de atenuación a 1550 nm menor de aproximadamente 0,24 dB/km a 1450 nm menor de aproximadamente 0,30 dB/km, un valor absoluto de dispersión a 1550 nm entre 2 y 20 ps/nm/km, y un valor absoluto de la pendiente de dispersión a 1550 nm menor de aproximadamente 0,040 ps/nm<sup>2</sup>/km.

45

**[0037]** Preferiblemente,  $\Delta n_1$  de la fibra óptica está entre aproximadamente 0,009 y 0,012,  $\Delta n_2$  está entre aproximadamente -0,0010 y -0,0025, y  $\Delta n_3$  está entre 0 y 0,006. Preferiblemente, el diámetro del campo modal es menor de aproximadamente 7,4 μm a 1550 nm y menor de aproximadamente 6,8 μm a 1450 nm. Más preferiblemente, el diámetro del campo modal es menor de aproximadamente 7,2 μm a 1550 nm y menor de aproximadamente 6,6 μm a 1450 nm.

50

**[0038]** Preferiblemente, la fibra óptica tiene un valor absoluto de la pendiente de dispersión a 1550 nm menor de 0,035 ps/nm<sup>2</sup>/km, preferiblemente menor de aproximadamente 0,030 ps/nm<sup>2</sup>/km.

55

**[0039]** Preferiblemente, la fibra óptica tiene una y sólo una longitud de onda de dispersión cero entre 1200 y 2000 nm.

60

**[0040]** En un cuarto aspecto, la invención se refiere a una preforma de fibra óptica para la elaboración de una fibra óptica para mejorar la amplificación Raman y la transmisión de longitudes de onda que incluyen la banda C, según la reivindicación 20, que comprende un núcleo de vidrio que incluye un núcleo interno que tiene una primera anchura y una primera diferencia del índice de refracción  $\Delta n_1$  entre aproximadamente 0,008 y 0,014 y una primera capa radialmente alrededor del núcleo interno a lo largo de la longitud de la fibra y que tiene una segunda anchura y una segunda diferencia del índice de refracción  $\Delta n_2$  de entre aproximadamente -0,0005 y -0,0030. La preforma también comprende un revestimiento de vidrio que rodea el núcleo de vidrio y que tiene una tercera anchura y una diferencia

del índice de refracción  $\Delta n_{CL}$  substancialmente igual a 0. El núcleo se selecciona de modo que la fibra realizada tiene un diámetro del campo modal a 1550 nm menor de aproximadamente 7,6  $\mu\text{m}$ , un coeficiente de atenuación a 1550 nm menor de aproximadamente 0,24 dB/km a 1450 nm menor de aproximadamente 0,30 dB/km, un valor absoluto de la dispersión a 1550 nm aproximadamente entre 2 y 20 ps/nm/km, y un valor absoluto de la pendiente de dispersión a 1550 nm menor aproximadamente 0,040 ps/nm<sup>2</sup>/km.

**[0041]** Debe entenderse que tanto la descripción general anterior como la siguiente descripción detallada son a modo de ejemplo y explicación y sólo tienen por objeto proporcionar una explicación más detallada de la invención reivindicada. La siguiente descripción, así como la práctica de la invención, exponen y proponen ventajas adicionales y propósitos de la invención.

#### Breve descripción de los dibujos

**[0042]** Los dibujos adjuntos, que se incorporan y forman parte de esta memoria, ilustran realizaciones de la invención y, junto con la descripción, sirven para explicar las ventajas y los principios de la invención.

La figura 1 es un diagrama esquemático de un enlace de transmisión óptica de acuerdo con la presente invención;  
 La figura 2 es una sección transversal de una fibra óptica posterior que tiene una baja área efectiva de acuerdo con la presente invención;  
 La figura 3 es un perfil del índice de refracción del radio de la fibra óptica en la figura 2 de acuerdo con una realización de la invención;  
 La figura 4 es un perfil del índice de refracción del radio de la fibra óptica en la figura 2 de acuerdo con una segunda realización de la invención;  
 La figura 5 es un perfil del índice de refracción del radio de la fibra óptica en la figura 2 de acuerdo con una tercera realización de la invención;  
 La figura 6 es un perfil del índice de refracción del radio de la fibra óptica en la figura 2 de acuerdo a una cuarta realización de la invención;  
 La figura 7 es un perfil del índice de refracción del radio de la fibra óptica en la figura 2 de acuerdo a una quinta realización de la invención;  
 La figura 8 es un perfil del índice de refracción del radio de la fibra óptica en la figura 2 de acuerdo con una sexta realización de la invención;  
 La figura 9 es un perfil del índice de refracción del radio de la fibra óptica en la figura 2 de acuerdo con una séptima realización de la presente invención; y  
 La figura 10 es un perfil del índice de refracción del radio de fibra óptica A10 tal como se describe en el ejemplo 3.

#### Descripción detallada de las realizaciones preferidas

**[0043]** Se hará ahora referencia a las varias realizaciones de acuerdo con esta invención, ejemplos de las cuales se muestran en los dibujos adjuntos y serán obvias partir de la descripción de la invención. En los dibujos, los mismos números de referencia que representan los mismos elementos o similares en los dibujos diferentes siempre que sea posible.

**[0044]** A lo largo de la presente descripción se hace referencia a perfiles del índice de refracción de las fibras ópticas. Los perfiles del índice de refracción comprenden diversas secciones dispuestas radialmente. Se hace referencia en la presente descripción o se ha representado en las figuras a formas geométricas precisas para estas secciones, tales como escalón o tipo gaussiano. Es evidente que los perfiles del índice de refracción obtenidos en la práctica pueden diferir de los perfiles idealizados anteriores. Se ha demostrado en la literatura, sin embargo, que estas diferencias no cambian las características de la fibra si se mantienen bajo control.

**[0045]** En general, una sección del perfil del índice de refracción (o segmento) tiene asociado una sección del perfil del índice de refracción equivalente que es diferente en forma y dimensiones. Un perfil del índice de refracción equivalente o sección del perfil puede sustituirse por su perfil del índice de refracción asociado o sección del perfil sin alterar el rendimiento de la guía de onda. Por ejemplo, véase "Single Mode Fiber Optics", Luc B. Jeunhomme, Marcel Dekker Inc., 1990, página 32, sección 1.3.2. Se entenderá que la divulgación y la reivindicación de una forma del perfil del índice de refracción particular y sus dimensiones incluyen los equivalentes asociados en la descripción y en las reivindicaciones.

**[0046]** De acuerdo con los principios de la presente invención, y tal como se hace referencia en general como 10 en la figura 1, un enlace de transmisión por fibra óptica comprende una primera fibra óptica en modo simple A y una segunda fibra óptica en modo simple B. Ambas fibras A y B son preferentemente las fibras ópticas de vidrio capaces de llevar señales ópticas de forma individual o por multiplexado de división de longitud de onda de través de largas distancias con baja atenuación. A la izquierda de la fibra A en la figura 1, se recibe una señal y se introduce en la

fibra para la transmisión posterior a una salida de señal en el extremo del enlace. La entrada de señal puede derivarse directamente desde un transmisor o desde otras partes (no representadas) de un sistema de transmisión óptica anterior al enlace 10, tal como un multiplexor de caída/adición, una unidad de compensación de dispersión, un amplificador óptico, o similares. De manera similar, la salida de la señal después del enlace 10 se pueden alimentar directamente a un receptor o en otras partes (no representadas) de un sistema de transmisión óptica, tal como un multiplexor de caída/adición, una unidad de compensación de dispersión, o similares.

**[0047]** El enlace de transmisión 10 puede incluir acopladores tales como 12 y 14 para añadir luz de la bomba en la fibra B. Las señales de la bomba se pueden derivar desde una o varias fuentes de la bomba (no representadas), tales como diodos láser. La luz de la bomba desde una fuente se alimenta a través del acoplador 12 en la fibra B para pasar de manera codireccional con luz de señal que pasa a lo largo del enlace de fibra 10. Además, o alternativamente, la misma o una señal de la bomba diferente puede alimentarse a través del acoplador 14 en la fibra B para pasar contra direccionalmente con la luz de señal que pasa a lo largo de enlace de fibra 10. Preferiblemente, los acopladores 12 y 14 son acopladores dicroicos convencionales.

**[0048]** La presente invención contempla la disposición del enlace 10 en una configuración híbrida donde un primer tramo A está hecho de fibra óptica que tiene un área efectiva relativamente grande y un segundo tramo B está hecho de fibra óptica que tiene un área efectiva más pequeña, un valor absoluto de pendiente de dispersión bajo y una baja atenuación. El área efectiva característica menor y la baja atenuación se aplican al tramo B en la longitud de onda de la señal por lo menos en la banda C y en la longitud de onda de la bomba, que es típicamente de 1450 nm aproximadamente. A diferencia de las fibras ópticas de dispersión aplanada, el segundo tramo de fibra B tiene una dispersión cero en una sola longitud de onda a través de la banda de longitud de onda de aproximadamente 1200-2000 nm.

**[0049]** Sobre la base de estas características, la fibra B está configurada para proporcionar amplificación Raman distribuida a las señales ópticas en el enlace debido a las señales de la bomba inyectadas a través de uno o ambos de los acopladores 12 y 14. La amplificación de la señal discreta a través de un dispositivo local dedicado tal como un amplificador de fibra dopada con erbio 16 se separa de la región de acoplamiento de las fibras A y B de modo que la potencia de una señal óptica que se lanza en la fibra B es substancialmente menor que la potencia en la entrada de la fibra A debido a la atenuación de la señal a su paso hasta el punto de la entrada de la fibra B. Típicamente, la potencia de una señal óptica lanzada a la fibra B no es significativamente diferente de la potencia de la señal óptica que emana de la fibra A.

**[0050]** La fibra de gran área efectiva se sabe que proporciona una mezcla de cuatro ondas favorables y rendimiento de efectos no lineales para los canales WDM. En el contexto de la presente invención, gran área efectiva se considera que es mayor de aproximadamente  $45 \mu\text{m}^2$  a 1550 nm (es decir, un diámetro de campo modal mayor de aproximadamente  $7,7 \mu\text{m}$ ). Por consiguiente, la fibra A permite la transmisión de canales WDM densos con una potencia de señal relativamente alta. Preferiblemente, la fibra A tiene características ópticas que incluyen dispersión local no cero, preferiblemente menor de  $-0,1 \text{ ps/nm/km}$  a 1625 nm, una pendiente de dispersión relativamente plana en todo el ancho de banda de operación 1530-1625, un área eficaz grande, preferiblemente entre aproximadamente  $45 \mu\text{m}^2$  y  $90 \mu\text{m}^2$  a 1550 nm, una baja pérdida óptica total, y un bajo contenido de flúor (para mejorar el control industrial de propiedades ópticas y para reducir la pérdida y dividir la pérdida). La fibra A tiene típicamente una longitud tal que una señal óptica que viaja a través de la misma se atenúa desde su potencia de entrada y necesita alguna amplificación.

**[0051]** La Tabla 1 muestra una lista de las características ópticas de las fibras de ejemplo A1-A10 que podrían utilizarse en un enlace solo o en como primera fibras de tramo A en una configuración híbrida, tal como se describe con más detalle a continuación. A lo largo de la presente descripción, las características de la fibra hacen referencia a una longitud de onda de 1550 nm si no se especifica lo contrario. Las fibras A1-A9 son convencionales, tal como se describe a continuación, la fibra A10 se describe en detalle a continuación.

Tabla 1

Primer tramo de la fibra	Dispersión (ps/nm-km)	Pendiente de dispersión (ps/nm <sup>2</sup> -km)	Área efectiva a 1450 nm (μm <sup>2</sup> )	Área efectiva (μm <sup>2</sup> )	Atenuación (dB/km)
A1	17	0,06	74	80	0,19
A2	4,1	0,08	58	70	0,20
A3	4,5	0,05	47	55	0,20
A4	8,0	0,06	56	65	0,20
A5	-3,1	0,07	45	55	0,20
A6	-3,5	0,11	53	70	0,21

A7	-3,0	0,05	44	50	0,21
A8	-3,2	0,08	53	68	0,21
A9	-3,5	0,05	44	50	0,21
A10	-4,5	0,045	43	50	0,21

Cada uno de estos ejemplos para la fibra A tiene un área efectiva superior a  $45 \mu\text{m}^2$  con baja atenuación, haciéndolas deseables para la transmisión de señales de alta potencia WDM (por ejemplo, en el orden de entre aproximadamente -10 dBm y +10 dBm por canal).

5

**[0052]** Una gran área efectiva, sin embargo, es perjudicial para la eficiencia de la amplificación Raman. El tramo de fibra B tiene un área efectiva inferior a la del tramo A (preferentemente menor o igual a  $45 \mu\text{m}^2$ ) para permitir una amplificación Raman eficiente de las señales ópticas. El tramo B está diseñado para permitir, si así se desea, para el bombeo contra direccional y co-direccional a través de acopladores 12 y 14 en una longitud de onda de bomba Raman de entre aproximadamente 1400 y 1500, preferentemente entre 1450 nm y 1490 nm.

10

**[0053]** En una realización preferida, el segundo tramo de fibra B tiene características ópticas que permiten tanto la amplificación Raman como la transmisión eficaz de los canales WDM. En particular, los solicitantes han encontrado que la fibra B debe tener un diámetro de campo modal menor de  $7,6 \mu\text{m}$  a 1550 nm y menor de  $7,0 \mu\text{m}$  a 1450 nm (preferiblemente menor de  $7,4 \mu\text{m}$  a 1550 nm y menor de  $6,8 \mu\text{m}$  a 1450 nm), un valor absoluto de dispersión entre aproximadamente 2 y 20 ps/nm/km a 1550 nm (preferiblemente con una dispersión de aproximadamente entre -3 y -8 ps/nm/km a 1550 nm y menor de  $-0,1 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$  a 1625 nm), y un valor absoluto de la pendiente de dispersión menor de aproximadamente  $0,040 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$  a 1550 nm (preferiblemente menor de aproximadamente  $0,035 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ , preferiblemente menor de aproximadamente  $0,030 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ ). La fibra B también tiene un coeficiente de atenuación a 1550 nm menor de aproximadamente 0,24 dB/km y a 1450 nm menor de aproximadamente 0,30 dB/km. La atenuación de macrocurvatura medida para 1 lazo sobre un mandril de 32 mm es menor de aproximadamente 0,5 dB a 1550 nm (preferiblemente menor de aproximadamente 0,2 dB) y menor de aproximadamente 1,0 dB a 1625 nm (preferiblemente menor de aproximadamente 0,5 dB). La sensibilidad de microcurvatura es menor de aproximadamente 8 (dB/km)/(g/mm) a 1550 nm (preferiblemente menor de 6 (dB/km)/(g/mm)) y menor de aproximadamente 12 (dB/km)/(g/mm) a 1625 nm (preferiblemente menor de 10 (dB/km)/(g/mm)).

15

20

25

**[0054]** Para lograr las ventajas de la invención, la fibra A no debe tener una baja pendiente en especial por sí misma. El uso de la fibra B, que tiene una baja pendiente de dispersión, la fibra A reducirá la pendiente del enlace de fibra conjunto. Preferiblemente, sin embargo, la fibra A también tiene una pendiente relativamente baja. En particular, la pendiente preferida de dispersión para la fibra A es de aproximadamente  $0,05 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$  o menos.

30

**[0055]** Una sección transversal (no a escala) de fibra óptica B de acuerdo con una realización preferida de la presente invención se ilustra esquemáticamente en la figura 2 y se designa en general con el número de referencia 20. De acuerdo con la presente invención, una transmisión de fibra óptica para su uso en un sistema de transmisión WDM incluye un núcleo de vidrio con un núcleo interno que tiene una primera diferencia del índice de refracción  $\Delta n_1$ , mayor que un índice de refracción de un revestimiento externo de vidrio de sílice substancialmente puro, y una primera capa radialmente alrededor del núcleo interno a lo largo de la longitud de la fibra y que tiene una segunda diferencia del índice de refracción  $\Delta n_2$ , inferior a un índice de refracción de un revestimiento exterior de vidrio de sílice substancialmente puro. El núcleo de la fibra puede tener una segunda capa radialmente alrededor de la primera capa a lo largo de la longitud de la fibra con una tercera diferencia del índice de refracción  $\Delta n_3$  mayor que 0. Además, el núcleo de la fibra puede tener una tercera capa radialmente alrededor de la segunda capa a lo largo de la longitud de la fibra con una cuarta diferencia del índice de refracción  $\Delta n_4$  inferior a 0. El revestimiento de vidrio rodea el núcleo de vidrio y tiene una diferencia del índice de refracción  $\Delta n_{CL}$  substancialmente igual a cero.

45

**[0056]** La fibra óptica 20 incluye un núcleo con una pluralidad de capas conductoras de vidrio y un revestimiento. El centro axial de la fibra 20 es el núcleo interno 22, que está hecho de cristal dopado. El núcleo interno 22 tiene una primera diferencia del índice de refracción  $\Delta n_1$  y un radio  $r_1$ . La diferencia del índice de refracción se refiere a la diferencia en el índice de refracción entre una determinada capa de vidrio y el vidrio del revestimiento. Es decir, por ejemplo, la diferencia del índice de refracción  $\Delta n_1$  del núcleo interno 22 es igual a  $n_1 - n_{CL}$ . La primera diferencia del índice de refracción  $\Delta n_1$  del núcleo interno 22 es entre aproximadamente 0,008 y 0,014, preferentemente entre 0,009 y 0,012. Preferiblemente, el núcleo interno 22 se hace de  $\text{SiO}_2$  dopado con una sustancia que aumenta el índice de refracción de  $\text{SiO}_2$  puro, tal como  $\text{GeO}_2$ . El núcleo interno 22 puede incluir un baño central generado durante el proceso de fabricación.

50

55

**[0057]** Una primera capa de vidrio 24 radialmente rodea el núcleo interno 22 a lo largo de la longitud de la fibra 20. La primera capa de vidrio 24 se extiende desde el radio exterior  $r_1$  del núcleo interno a un radio  $r_2$  y tiene un índice de refracción disminuido  $\Delta n_2$  a través de su anchura en comparación con la región 22. El índice de refracción  $\Delta n_2$  de la primera capa de vidrio 24 está deprimido. Un índice de refracción deprimido se produce cuando el índice de

refracción de una capa de vidrio dada es menor que el índice de refracción de la capa de revestimiento, es decir,  $\Delta n_2$  es inferior a 0. La segunda diferencia del índice de refracción  $\Delta n_2$  de la primera capa de vidrio 24 está entre aproximadamente -0,0005 y -0,0030. Como es bien sabido en la técnica, el índice deprimido es más bajo debido a la adición de dopantes en la región 24, tal como el flúor.

5

**[0058]** Una segunda capa de vidrio 26 puede rodear radialmente la primera capa de vidrio 24 a lo largo de la longitud de la fibra 20. La segunda capa de vidrio 26 se extiende desde el radio exterior  $r_2$  de la primera capa de vidrio en un radio  $r_3$  y tiene un índice de refracción  $\Delta n_3$ , en su anchura, mayor que 0 y menor que 0,006. Preferiblemente, la segunda capa de vidrio 26 está hecha de  $\text{SiO}_2$ , dopado con una sustancia que aumenta el índice de refracción del  $\text{SiO}_2$  puro, tal como  $\text{GeO}_2$ .

10

**[0059]** Una tercera capa de vidrio 28 puede rodear radialmente la segunda capa de vidrio 26 a lo largo de la longitud de la fibra 20. Si se utiliza, la tercera capa de vidrio 28 se extiende desde el radio exterior  $r_3$  de la segunda capa de vidrio 26 a un radio exterior  $r_4$ , y tiene un índice de refracción negativo mínimo  $\Delta n_4$ . Tal como se describe posteriormente, una realización preferida de la presente invención tiene un índice de refracción  $\Delta n_4$  para la tercera capa 28 que es mayor que  $\Delta n_2$ .

15

**[0060]** Finalmente, un revestimiento conductor de luz 29 rodea el núcleo de una manera convencional para ayudar a propagar la luz de guía a lo largo del eje de la fibra 20. El revestimiento 29 puede comprender vidrio de  $\text{SiO}_2$  puro con una diferencia del índice de refracción substancialmente igual a cero o incluir un dopante que modifica el índice de refracción.

20

**[0061]** La fibra óptica 20 se puede fabricar mediante cualquier técnica conocida para el depósito de partículas de vidrio para formar una preforma óptica. Enfoques comunes fácilmente conocidos en el campo incluyen deposición axial de fase de vapor (VAD), deposición de vapor exterior (OVD), y deposición de vapor químico modificado (MCVD). Los solicitantes prefieren MCVD a partir de las realizaciones aquí descritas.

25

**[0062]** La preforma óptica incluye segmentos de perfil seleccionados para proporcionar las características de transmisión necesarias para la fibra realizada.

30

**[0063]** El enlace combinado 10 de la fibra A y de la fibra B en la figura 1 tiene una dispersión cromática local que es diferente de cero a lo largo de toda la banda de transmisión, preferentemente con un valor absoluto de dispersión mayor de 1 ps/nm/km en toda la banda. La línea combinada también tiene una baja pendiente de dispersión total, una baja pérdida óptica total, alta eficiencia Raman y una moderada retrodispersión de la sección de enlace donde la bomba Raman se lanza en la trayectoria óptica.

35

**[0064]** Una comprensión de las ventajas de la presente invención se puede lograr a través de una comparación entre los distintos tipos de enlaces ópticos. La Tabla 2 muestra las características ópticas de fibras diferentes. Con la excepción de las fibras de la técnica anterior B1, B5 y B6, las fibras de la tabla 2 son fibras de ejemplo B para explorar las ventajas de la invención cuando se combinan después de las fibras A de la Tabla 1. Las fibras invención B2-B4 y B7-B12 tienen diferentes niveles de área efectiva menor o igual a  $40 \mu\text{m}^2$ , baja atenuación y dispersión, dispersión no cero a 1550 nm, y bajo valor absoluto de la pendiente de dispersión.

40

Tabla 2

45

Segundo tramo de fibra	Dispersión (ps/nm-km)	Pendiente de dispersión (ps/nm <sup>2</sup> -km)	EA ( $\mu\text{m}^2$ ) [1450 nm]	EA ( $\mu\text{m}^2$ ) [1550 nm]	Atenuación (dB/km) [1450 nm]	Atenuación (dB/km) [1550 nm]
B1 (técnica anterior)	-17	-0,6	20-30	25-35	> 0,30 *	0,24 *
B2	4	0,03	35	40	0,28 *	0,21 *
B3	-18	0,02	28	35	0,30 *	0,23 *
B4	-8	0,02	29	35	0,29 *	0,22 *
B5 (técnica anterior)	-3,1	0,07	45	55	0,28	0,21
B6 (técnica anterior)	-3,0	0,05	44	50	0,28	0,21
B7	-3,2	0,03	34	40	0,28 *	0,21 *
B8	-3,5	0,03	34	40	0,28 *	0,21 *

B9	-3,5	0,03	30	35	0,28 *	0,21 *
B10	-3,5	0,02	34	40	0,28 *	0,21 *
B11	-3,5	0,02	30	35	0,28 *	0,21 *
B12	-4,2	0,02	30	35	0,28 *	0,21 *

5 **[0065]** Los asteriscos \* en la tabla 2 designan que los valores indicados se derivaron de las simulaciones por ordenador. Los valores de atenuación se refieren a un promedio de una producción en masa de la fibra, en lugar de cantidades aisladas. La Tabla 3 identifica las características ópticas de un enlace óptico tal como 10 con la combinación de fibras ópticas que se describe con más detalle a continuación. Estas combinaciones ofrecen ejemplos comparativos de la presente invención.

Tabla 3

Enlace	Dispersión (ps/nm-km)	Pendiente de dispersión (ps/nm <sup>2</sup> -km)	Atenuación (dB/km)
Fibra A1 sólo	17	0,06	0,20
Fibras A1→B1	0	0,0	0,22
Fibra A2 sólo	4,1	0,08	0,21
Fibra A3 sólo	4,5	0,05	0,21
Fibra A4 sólo	8,0	0,06	0,21
Fibra A5 sólo	-3,1	0,07	0,21
Fibra A6 sólo	-3,5	0,11	0,21
Fibras A6→B5	-3,3	0,09	0,21
Fibra A7 sólo	-3,0	0,05	0,21
Fibra A8 sólo	-3,2	0,08	0,21
Fibra A8→B6	-3,1	0,065	0,21

10

**[0066]** La Tabla 4 enumera las características ópticas de combinaciones de fibras ópticas A y B según la presente invención y se describen con más detalle a continuación.

Tabla 4

15

Enlace	Dispersión (ps/nm-km)	Pendiente de dispersión (ps/nm <sup>2</sup> -km)	Atenuación (dB/km)
Fibras A1→ B2	10	0,045	0,205
Fibras A1→ B3	0	0,04	0,215
Fibras A2→ B2	4	0,055	0,21
Fibras A3→ B2	4,3	0,04	0,21
Fibras A4→ B2	6	0,045	0,21
Fibras A4→ B4	0	0,04	0,215
Fibras A5→ B7	-3,1	0,05	0,21
Fibras A6→ B8	-3,5	0,07	0,21
Fibras A8→ B7	-3,2	0,055	0,21
Fibras A7→ B9	-3,3	0,04	0,21
Fibras A8→ B10	-3,3	0,05	0,21
Fibras A9→ B11	-3,5	0,035	0,21

Fibras A10→ B12	-4,3	0,033	0,21
-----------------	------	-------	------

### Ejemplo 1

5 **[0067]** Como un primer ejemplo comparativo se refiere a las tablas 1-4, un enlace óptico está formado por la fibra A1, que es una fibra de un solo modo convencional de acuerdo a ITU-T Rec. G652. Alternativamente, la fibra A1 podría ser una fibra núcleo de sílice puro, que tiene en general una mayor dispersión positiva. Las tablas 1 y 3 listan el rendimiento óptico de la fibra A1 cuando se utiliza como fibra única en el enlace. Esta fibra de un solo modo estándar proporciona una dispersión total muy alta que requiere de fuerte compensación de la dispersión. Además, esta fibra tiene una baja eficiencia Raman, que se opone a la amplificación distribuida.

10 **[0068]** Alternativamente, la fibra A1 se puede acoplar con la fibra B1, que tiene un valor igual pero opuesto de la dispersión y de la pendiente de dispersión. Tal como se muestra en la tabla 3, la combinación de estas fibras A1 y B1 proporciona una compensación de la dispersión en el enlace y una pendiente total a lo largo del enlace de aproximadamente 0 ps/nm<sup>2</sup>/km. Sin embargo, para alcanzar la pendiente muy negativa de dispersión en la fibra B1, debe utilizarse un alto contenido de flúor, lo que conduce a la pérdida de empalme y a una alta sensibilidad de flexión para la fibra B1 (especialmente en la banda L) y una dificultad conjunta en el control de la dispersión y la pendiente de dispersión industrialmente. Además, en caso de amplificación Raman distribuida, la estructura de la fibra B1 necesaria para alcanzar las características ópticas indicadas provoca una gran pérdida de dispersión que agotará la señal y la bomba y provocará niveles elevados de ruido debido a la retrodispersión simple y doble.

20 **[0069]** Por el contrario, la ventaja de la presente invención puede verse a través de la combinación de la fibra A1 con fibras B2 o B3. La Tabla 4 enumera las características ópticas de estas fibras combinadas. La fibra B3 tiene una dispersión similar y áreas efectivas tal como la fibra B1, pero una pendiente de dispersión diferente. Dado que la fibra B1 tiene una pendiente de dispersión negativa y la fibra B3 tiene una pendiente positiva, un experto en la materia podrá apreciar que la fibra B1 tiene un contenido de flúor superior a la fibra B3. Comparativamente, la fibra B1 tendrá una mayor difusión y mayor ruido que la fibra B3.

30 **[0070]** El enlace de fibras A1 con fibras B2 o B3, a pesar de una pendiente de dispersión total no cero, sólo proporciona una pérdida de dispersión moderada del segundo tramo de la fibra, pero con una alta eficiencia Raman. Por lo tanto, el segundo tramo de fibra puede ser bombeado para lograr la amplificación Raman. Debido a un moderado contenido de flúor del tipo de fibra B, las fibras en el enlace tienen una pérdida moderada de empalme. La combinación de la fibra A1 con la fibra B2 tiene una dispersión total moderada y la proporción entre la pendiente y la dispersión es de aproximadamente 0,004 nm<sup>-1</sup>, que puede ser fácilmente compensada con módulos de compensación de la dispersión separados. El uso de la fibra B3 proporciona compensación de la dispersión en la línea y le da una baja pendiente de dispersión total. En consecuencia, la combinación de un tramo de fibra de un solo modo estándar con un tramo de fibra B2 o B3 puede permitir la amplificación Raman en el segundo tramo y permitir la transmisión eficiente de canales WDM a través de largas distancias.

### Ejemplo 2

40 **[0071]** Un segundo ejemplo de la presente invención es un enlace de múltiples fibras con un primer tramo de fibra de dispersión positiva no cero. La tabla 1 indica las características ópticas de las fibras convencionales, tales como las fibras A2-A4. Ejemplos de fibra A2 son fibras Corning LEAF™ y Pirelli™ FreeLight. Un ejemplo de fibra A3 es fibra Lucent TrueWave® RS, y un ejemplo de fibra A4 es fibra Alcatel TeraLight™. Cuando cualquiera de estas fibras se usa solo en un enlace, el enlace tiene una pendiente de dispersión relativamente alta y una baja eficiencia Raman.

50 **[0072]** En contraste, el uso de una de las fibras B2 o B4 como un segundo tramo en el enlace ayuda a lograr los resultados deseados en consonancia con la presente invención. La tabla 4 muestra las características ópticas logradas mediante la combinación de estas fibras. Los valores en la Tabla 4 son para el enlace en solitario (suponiendo una relación de longitud del tramo de 1:1) y no tener en cuenta la contribución de los módulos de compensación de la dispersión posteriores o anteriores al enlace. En general, el enlace combinado puede proporcionar una alta eficiencia Raman con un ruido moderado a partir de retrodispersión doble y única, junto con una moderada dispersión y relación de pendiente de dispersión de fácil compensación con módulos de compensación de la dispersión separados. Además, el enlace que tiene una de las fibras A2-A4 acopladas con fibras B2 o B4 tendrá una pérdida moderada de empalme.

60 **[0073]** La figura 3 muestra el perfil del índice de refracción de un ejemplo de una fibra óptica 20 de conformidad con la presente invención que tiene características de dispersión positivas, una baja pendiente de dispersión, una baja área efectiva, y una baja flexión de pérdida. Esta fibra se asemeja a la fibra B2. A lo largo de la presente descripción radios y anchuras se definen en términos de la sigma de las curvas de Gauss adoptadas para el modelado del perfil del índice. El modelo utilizado para la distribución del perfil del índice de refracción de este y

otros ejemplos es una superposición de curvas similares a gaussianas, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\Delta n(r) = \Delta n_1 * \exp\left(-\frac{1}{2} \left| \frac{r}{\sigma_1} \right|^{g_1}\right) + \Delta n_2 * \exp\left(-\frac{1}{2} \left| \frac{r - r_{dep}}{\sigma_2} \right|^{g_2}\right) +$$

$$+ \Delta n_3 * \exp\left(-\frac{1}{2} \left| \frac{r - r_{out}}{\sigma_3} \right|^{g_3}\right) + \Delta n_4 * \exp\left(-\frac{1}{2} \left| \frac{r - r_{outdep}}{\sigma_4} \right|^{g_4}\right)$$

5 **[0074]** Donde  $\Delta n_i$  son las diferencias máximas del índice de refracción de los segmentos respectivos,  $\sigma_i$  son los radios o anchuras de los segmentos respectivos y:

10

$$g_1 = 12$$

$$g_2 = 3$$

$$g_3 = 4$$

$$g_4 = 4$$

$$r_{dep} = 1,15 * (\sigma_1 + \sigma_2)$$

$$r_{out} = r_{dep} + 1,15 * \sigma_2 + 1,1 * \sigma_3$$

$$r_{outdep} = r_{out} + 1,15 * \sigma_3 + 1,1 * \sigma_4$$

15

20 **[0075]** Tal como se muestra en la figura 3, el núcleo interno 22 tiene una diferencia del índice de refracción máxima  $\Delta n_1$  de aproximadamente 0,00875 y se extiende en un radio  $r_1$  (es decir,  $\sigma_1$ ) de aproximadamente 2,6  $\mu\text{m}$  antes de pasar a la primera capa 24. La diferencia del índice de refracción del núcleo interno 22 puede establecerse mediante el dopaje de la anchura del núcleo interno con  $\text{GeO}_2$  o con cualquier otro dopante conocido que aumente el índice de refracción. Aunque la figura 3 muestra el núcleo interno 22 como teniendo el índice de refracción con una pendiente decreciente con radio, su perfil puede tener otras geometrías determinadas por el proceso de fabricación seleccionado.

25 **[0076]** La primera capa de vidrio 24 tiene una diferencia del índice de refracción reducida  $\Delta n_2$  en su pico de aproximadamente -0,0017. La capa 24 tiene una sigma ( $\sigma_2$ ) de aproximadamente 2,11  $\mu\text{m}$ , que se extiende a una distancia radial de aproximadamente 7,8  $\mu\text{m}$  al inicio de la capa adyacente 26. La diferencia del índice de refracción de la primera capa de vidrio 24 puede reducirse mediante el dopaje de la anchura de la primera capa del núcleo con flúor u otros dopantes conocidos, de una manera convencional. La primera capa 24 se muestra que tiene un perfil similar a gaussiano, pero otras geometrías se pueden seleccionar o alcanzar para la capa 24.

30 **[0077]** La segunda capa de vidrio 26 que rodea la capa 24 tiene una diferencia del índice de refracción mayor que 0 y un valor de  $\Delta n_3$  en su máximo de aproximadamente 0,003. La capa 26 tiene una sigma ( $\sigma_3$ ) de aproximadamente 1,09  $\mu\text{m}$ , extendiéndose radialmente a aproximadamente 10,6  $\mu\text{m}$ , donde la diferencia del índice de refracción vuelve a 0. La segunda capa 26 se muestra que tiene un perfil similar a gaussiano, pero otras geometrías pueden seleccionarse o alcanzarse para la capa 26, por ejemplo, puede comprender una cola con una diferencia del índice de refracción positiva en su sección radialmente externa.

35 **[0078]** La tercera capa de vidrio 28 alcanza un índice de refracción máximo  $\Delta n_4$  de aproximadamente -0,00076 y tiene una sigma ( $\sigma_4$ ) de aproximadamente 1  $\mu\text{m}$ . La tercera capa de vidrio 28 está rodeada por un revestimiento 29 que tiene una diferencia del índice de refracción de aproximadamente 0 hecha de sílice substancialmente pura.

40 **[0079]** La realización específica de la fibra 20 que se ilustra en la Figura 3 tiene las siguientes características de transmisión óptica, que se han generado a través de simulaciones por ordenador:

45

Corte teórico LP11 = 1270 nm  
Corte teórico LP02 = 1560 nm

50 **[0080]** En general, el cable cortado de acuerdo con ITU-T Rec. G650 tiene entre 200 y 400 nm menos que los valores de corte teóricos más grandes.

Longitud de onda de dispersión cero = 1450 nm  
Pendiente de dispersión cero = 0,043 ps/nm<sup>2</sup>/km

Dispersión en 1550; 1625 nm = 3,8; 5,9 ps/nm/km

Pendiente de dispersión a 1550; 1625 nm = 0,031, 0,027 ps/nm<sup>2</sup>/km

Diámetro de campo modal en 1450; 1550; 1625 nm = 6,9; 7,4; 7,83 μm

Área efectiva en 1450, 1550, 1625 nm = 36,1, 41,2, 46,2 μm<sup>2</sup>

5 Coeficiente de no linealidad γ en 1450; 1550; 1625 nm = 2,87; 2,19; 1,76 W<sup>-1</sup> km<sup>-1</sup>

Atenuación macrocurvatura a 1550; 1625 nm ≤ 0,1; 0,5 dB para un bucle de 32 mm de diámetro

**[0081]** Sensibilidad a la microcurvatura a 1550, 1625 nm ≤ 2, 4 (dB/km)/(g/mm). La sensibilidad a la microcurvatura se determinó mediante el procedimiento de la bobina expansible, tal como se describe, por ejemplo, en G. Grasso y F. Meli "Microbending losses of cabled single-mode fibers", ECOC'88, página 526 y siguientes, o en G. Grasso et al. "Microbending effects in single-mode optical cables", International Wire and Cable Symposium, 1988, página 722 y siguientes.

### Ejemplo 3

15 **[0082]** Un tercer ejemplo de la presente invención es un enlace de múltiples fibras con un primer tramo de fibra de fibra de dispersión negativo no cero. La tabla 1 recoge las características ópticas de estas fibras, tal como las fibras A5-A10. Un ejemplo de una fibra en esta categoría es la fibra Pirelli DeepLight™. Con cualquiera de estas fibras usada en solitario, o con fibras híbridas formadas a partir de fibra A6 y fibra B5 y a partir de fibra A8 y fibra B6 tal como se muestra en la Tabla 3, el enlace tendrá una pendiente de dispersión relativamente alta y una baja eficiencia Raman, de manera que es indeseable para amplificación Raman. La mayoría de estos ejemplos comparativos tienen una longitud de onda de dispersión cero por debajo de 1600 nm, que los hace inadecuados para la transmisión de canales WDM en la banda L. El ejemplo de la fibra A7 no tiene una longitud de onda de dispersión cero por debajo de 1600 nm, pero aún tiene una baja dispersión (aproximadamente -1,0 ps/nm/km) a 1600 nm, que no es adecuado para los canales WDM densos en la banda L.

20 **[0083]** Una fibra desarrollada por los solicitantes que puede utilizarse ventajosamente en un enlace óptico adaptado para la banda L es la fibra A10.

25 **[0084]** La figura 10 muestra el perfil del índice de refracción de un ejemplo de la fibra óptica A10. En este ejemplo, el núcleo interno tiene una diferencia del índice de refracción de aproximadamente 0,0087 y un radio de aproximadamente 2,56 μm. La primera capa fuera del núcleo interno, que se dopa con flúor, tiene una diferencia del índice de refracción negativa de aproximadamente -0,0022 y una sigma de aproximadamente 1,41 μm. La segunda capa es de 0,92 μm de ancho y tiene una diferencia del índice de refracción de 0,0045. Finalmente, el anillo externo es ligeramente dopado inferiormente para producir una diferencia del índice de refracción de -0,0008 y tiene una sigma de aproximadamente 1 μm. Un experto en la materia comprenderá fácilmente que se pueden utilizar numerosos dopantes para aumentar el índice de refracción de la segunda capa, pero se prefiere GeO<sub>2</sub>. En este ejemplo, la siguiente capa es esencialmente el revestimiento.

30 **[0085]** La realización específica de la fibra A10 que se ilustra en la figura 10 tiene las siguientes características de transmisión óptica, que se han generado a través de simulaciones por ordenador:

Corte teórico LP11 = 1386 nm

Corte teórico LP02 = 1494 nm

35 **[0086]** En general, el cable cortado de acuerdo a G650 Rec. tiene entre 200 y 400 nm menos que los valores de corte teórico más grandes.

Pendiente de dispersión cero = 0,043 ps/nm<sup>2</sup>/km

Dispersión en 1450; 1550; 1625 nm = -8,5; -4,3, -0,4 ps/nm/km

40 Pendiente de dispersión en 1450; 1550; 1625 nm = 0,038, 0,046, 0,058 ps/nm<sup>2</sup>/km

Diámetro de campo modal en 1450; 1550; 1625 nm = 7,2; 7,9; 8,5 μm

Área efectiva en 1450, 1550, 1625 nm = 39,2, 48,1, 57,0 μm<sup>2</sup>

Coeficiente de no linealidad γ en 1450; 1550; 1625 nm = 2,63; 1,87; 1,42 W<sup>-1</sup> km<sup>-1</sup>

45 Atenuación de la macrocurvatura a 1550; 1625 nm ≤ 0,2; 1,0 dB para un bucle de 32 mm de diámetro

50 Sensibilidad a la microcurvatura a 1550, 1625 nm ≤ 4, 8 (dB/km)/(g/mm).

55 **[0087]** Tal como se había anticipado anteriormente, la fibra A10 tiene características de microcurvatura, macrocurvatura y dispersión no cero en la banda L que la hacen que sea especialmente ventajosa para transmisiones WDM en (o que incluyen) esta banda. En particular, esta fibra tiene un valor absoluto de dispersión de aproximadamente 2,3 ps/nm/km en una longitud de onda de 1600 nm. Los solicitantes han determinado que las mismas características ópticas se puede lograr, en general, mediante una fibra que tiene un perfil del índice de refracción del núcleo que comprende un núcleo interno con una diferencia del índice de refracción entre aproximadamente 0,008 y 0,012 y un radio (sigma) de entre aproximadamente 2,4 y 2,8 μm; una primera capa fuera del núcleo interno, que se dopa con flúor, que tiene una diferencia del índice de refracción negativa entre

aproximadamente -0,0030 y -0,0020 y una sigma de entre aproximadamente 1,0 y 1,6  $\mu\text{m}$ ; una segunda capa que con aproximadamente 0,8 a 1,1  $\mu\text{m}$  de ancho y que tiene una diferencia del índice de refracción entre aproximadamente 0,0030 y 0,0060. Finalmente, la fibra puede comprender un anillo externo dopado hacia abajo.

5 **[0088]** La tabla 4 muestra el rendimiento óptico mejorado que se puede conseguir con una fibra con una baja área efectiva que tiene una baja pendiente de dispersión, tal como las fibras B7-B12, que se enumeran en la Tabla 2. Estas combinaciones que se muestran en la Tabla 4 proporcionan una baja pendiente de dispersión a través del enlace, junto con una alta eficiencia Raman y una retrodispersión simple y doble moderada. Además, estos enlaces presentan una pérdida moderada y una pérdida moderada de empalme. En la combinación preferida de la fibra A10 con la fibra B12, el enlace es particularmente adecuado para la transmisión WDM en la banda L, porque el valor absoluto de la dispersión local está siempre por encima de 1 ps/nm/km en la banda L. Además, este enlace que permite la transmisión WDM hiper-densa en la banda C, debido a un valor relativamente alto de dispersión.

10 **[0089]** La figura 4 muestra el perfil del índice de refracción de un ejemplo de una fibra óptica 20 según la presente invención que tiene una dispersión negativa. Los parámetros de la diferencia del índice de refracción y el radio de las capas de vidrio 22, 24, 26 y 28 se muestran en la figura 4. En este ejemplo, el núcleo tiene un índice de refracción diferencia máxima de alrededor de 0,0098 y un radio de alrededor de 2,34  $\mu\text{m}$ . La primera capa fuera del núcleo, que es dopado con flúor, tiene una diferencia del índice de refracción negativa de aproximadamente -0,0017 y una sigma de aproximadamente 1,722  $\mu\text{m}$ . La segunda capa fuera del núcleo tiene aproximadamente 0,8315  $\mu\text{m}$  de ancho y tiene una diferencia del índice de refracción de 0,0028. Un experto en la materia comprenderá fácilmente que se pueden utilizar numerosos dopantes para aumentar el índice de refracción de la segunda capa, pero se prefiere  $\text{GeO}_2$ . En esta realización, la siguiente capa es esencialmente el revestimiento, ya que no tiene dopantes pensados para cambiar su índice de refracción del vidrio de sílice pura.

25 **[0090]** La realización específica de la fibra 20 que se muestra en la figura 4 tiene las siguientes características de transmisión óptica, que se han generado a través de simulaciones por ordenador:

Corte teórico LP11 = 1165 nm

Corte teórico LP02 = 1492 nm

30 Dispersión en 1450; 1550; 1625 nm = -6,4; -3,1; -0,8 ps/nm/km

Pendiente de dispersión en 1450; 1550; 1625 nm = 0,036, 0,030, 0,032 ps/nm<sup>2</sup>/km

Diámetro de campo modal en 1450; 1550; 1625 nm = 6,6; 7,2; 7,7  $\mu\text{m}$

Área eficiente en 1450, 1550, 1625 nm = 32,9, 38,7, 44,6  $\mu\text{m}^2$

Coefficiente de no linealidad  $\gamma$  en 1450; 1550; 1625 nm = 3,18; 2,35; 1,84  $\text{W}^{-1} \text{km}^{-1}$

35 Atenuación de macrocurvatura en 1550; 1625 nm  $\leq$  0,1; 1,0 dB para un bucle de 32 mm de diámetro

Sensibilidad de microcurvatura en 1550, 1625 nm  $\leq$  2, 4 (dB/km)/(g/mm).

40 **[0091]** La figura 5 muestra el perfil del índice de refracción de otro ejemplo de una fibra óptica 20 según la presente invención. Los parámetros de la diferencia del índice de refracción y el radio de las capas de vidrio 22, 24, 26 y 28 se muestran en la figura 5. Esta fibra óptica tiene un núcleo con tres capas dopadas que lo rodean. El núcleo tiene un radio de aproximadamente 2,36  $\mu\text{m}$  y con una diferencia del índice de refracción máxima de aproximadamente 0,0099. La primera capa, que está poco dopada con flúor o un dopante similar, tiene una diferencia del índice de refracción máxima de aproximadamente -0,0017 a través de una sigma de aproximadamente 1,976. La segunda capa fuera del núcleo tiene una diferencia del índice de refracción máxima de aproximadamente 0,003 a través de una sigma de 1,25  $\mu\text{m}$ . Finalmente, el anillo externo está dopado ligeramente menos para producir una diferencia del índice de refracción de -0,0007 y tiene una sigma ( $\sigma_4$ ) de aproximadamente 1  $\mu\text{m}$ .

50 **[0092]** La realización específica de la fibra 20 que se ilustra en la figura 5 tiene las siguientes características de transmisión óptica, que se han generado a través de simulaciones por ordenador:

Corte teórico LP11 = 1430 nm

Corte teórico LP02 = 1657 nm

Dispersión en 1450; 1550; 1625 nm = -5,9; -3,5, -2,0 ps/nm/km

Pendiente de dispersión en 1450; 1550; 1625 nm = 0,0310; 0,0204, 0,0206 ps/nm<sup>2</sup>/km

55 Diámetro de campo modal en 1450; 1550; 1625 nm = 6,6; 7,1; 7,6  $\mu\text{m}$

Área efectiva en 1450, 1550, 1625 nm = 32,4, 38,0, 43,8  $\mu\text{m}^2$

Coefficiente de no linealidad  $\gamma$  en 1450, 1550, 1625 nm = 3,23; 2,40; 1,88  $\text{W}^{-1} \text{km}^{-1}$

Atenuación de macrocurvatura a 1550; 1625 nm  $\leq$  0,1; 1,0 dB para un bucle de 32 mm de diámetro

Sensibilidad de microcurvatura a 1550, 1625 nm  $\leq$  2, 4 (dB/km)/(g/mm).

60 **[0093]** La figura 6 muestra el perfil del índice de refracción de otro ejemplo de una fibra óptica 20 según la presente invención. Los parámetros de la diferencia del índice de refracción y el radio de las capas de vidrio 22, 24, 26 y 28 se muestran en la figura 6. Esta fibra, que se asemeja a la fibra B2, tiene un núcleo y tres capas dopadas que lo rodean. Los valores máximos del índice de refracción son 0,0104, -0,0017, 0,003, y -0,0007, respectivamente.

El núcleo tiene un radio de aproximadamente 2,27  $\mu\text{m}$ , mientras que las tres capas que lo rodean tienen aproximadamente 2,062  $\mu\text{m}$ , 1,135  $\mu\text{m}$  y 1  $\mu\text{m}$  de ancho, respectivamente. Este ejemplo es la realización preferida.

- 5 **[0094]** La realización específica de la fibra 20 se muestra en la figura 6 tiene las siguientes características de transmisión óptica, que se han generado a través de simulaciones por ordenador:

Corte teórico LP11 = 1294 nm

Corte teórico LP02 = 1576 nm

Dispersión en 1450; 1550; 1625 nm = -6,7; -4,2, -2,8 ps/nm/km

- 10 Pendiente de dispersión a 1450; 1550; 1625 nm = 0,032, 0,020, 0,019 ps/nm<sup>2</sup>/km

Diámetro de campo modal en 1450; 1550; 1625 nm = 6,4; 6,9; 7,4  $\mu\text{m}$

Área efectiva en 1450, 1550, 1625 nm = 30,7, 36,0, 41,4  $\mu\text{m}^2$

Coefficiente de no linealidad  $\gamma$  en 1450; 1550; 1625 nm = 3,42; 2,54; 1,996 W<sup>-1</sup>km<sup>-1</sup>

Atenuación de macrocurvatura en 1550; 1625 nm  $\leq$  0,1; 1,0 dB para un bucle de 32 mm de diámetro

- 15 Sensibilidad de Microcurvatura en 1550, 1625 nm =  $\leq$  2, 3 (dB/km)/(g/mm).

**[0095]** La figura 7 muestra el perfil del índice de refracción de otro ejemplo de una fibra óptica 20 según la presente invención que tiene una dispersión negativa. Los parámetros la diferencia del índice de refracción y el radio de las capas de vidrio 22, 24, 26 y 28 se muestran en la figura 7. En esta realización, la fibra tiene un núcleo de tres capas dopadas que lo rodean. El núcleo tiene una diferencia del índice de refracción de aproximadamente 0,011, mientras que las capas que lo rodean, respectivamente, tienen valores de aproximadamente -0,0017, 0,003, y -0,0007. El núcleo tiene un radio de aproximadamente 2,149  $\mu\text{m}$ , mientras que en las siguientes tres capas que lo rodean tienen una sigma de aproximadamente 1,849  $\mu\text{m}$ , 1,20  $\mu\text{m}$  y 1  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

- 25 **[0096]** La realización específica de la fibra 20 que se ilustra en la figura 7 tiene las siguientes características de transmisión óptica, que se han generado a través de simulaciones por ordenador:

Corte teórico LP11 = 1319 nm

Corte teórico LP02 = 1552 nm

- 30 Dispersión en 1450; 1550; 1625 nm = -11,4; -9,4, -7,8 ps/nm/km

Pendiente de dispersión en 1450; 1550; 1625 nm = 0,0242; 0,0183, 0,0249 ps/nm<sup>2</sup>/km

Diámetro de campo modal en 1450; 1550; 1625 nm = 6,27; 6,86; 7,39  $\mu\text{m}$

Área efectiva en 1450, 1550, 1625 nm = 29,5, 35,4, 41,5  $\mu\text{m}^2$

Coefficiente de no linealidad  $\gamma$  en 1450; 1550; 1625 nm = 3,58, 2,60, 2,00 W<sup>-1</sup>km<sup>-1</sup>

- 35 Atenuación de macrocurvatura en 1550; 1625 nm  $\leq$  0,1; 1,0 dB para un bucle de 32 mm de diámetro

Sensibilidad de microcurvatura en 1550, 1625 nm  $\leq$  2, 4 (dB/km)/(g/mm).

**[0097]** La figura 8 muestra el perfil del índice de refracción de otro ejemplo de una fibra óptica 20 según la presente invención. Los parámetros de la diferencia del índice de refracción y el radio de las capas de vidrio 22, 24, 26 y 28 se muestran en la figura 8. Tal como se muestra en la figura 8, la fibra de esta realización tiene un núcleo con una diferencia del índice de refracción de aproximadamente 0,0124 máxima a través de un radio de aproximadamente 1,954  $\mu\text{m}$ . La primera capa que rodea el núcleo se ha dopado de manera reducida con una sustancia para producir una diferencia del índice de refracción de aproximadamente -0,0017 a través de una sigma de aproximadamente 1,714  $\mu\text{m}$ . Las dos capas finales tienen diferencias del índice de refracción máximas de aproximadamente 0,003 y -0,0005, respectivamente, sigma de aproximadamente 1,296  $\mu\text{m}$  y 1  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

- 45 **[0098]** La realización específica de la fibra 20 que se ilustra en la figura 8 tiene las siguientes características de transmisión óptica, que se han generado a través de simulaciones por ordenador:

- 50 Corte teórico LP11 = 1453 nm

Corte teórico LP02 = 1619 nm

Dispersión en 1450; 1550; 1625 nm = -19,2; -18,0; -16,2 ps/nm/km

Pendiente de dispersión en 1450; 1550; 1625 nm = 0,012, 0,016, 0,036 ps/nm<sup>2</sup>/km

Diámetro de campo modal en 1450; 1550; 1625 nm = 6,06; 6,72; 7,33  $\mu\text{m}$

- 55 Área efectiva en 1450, 1550, 1625 nm = 27,5, 34,2, 41,5  $\mu\text{m}^2$

Coefficiente de no linealidad  $\gamma$  en 1450; 1550; 1625 nm = 3,88, 2,72, 2,02 W<sup>-1</sup>km<sup>-1</sup>

Atenuación de macrocurvatura en 1550; 1625 nm  $\leq$  0,1; 1,0 dB para un bucle de 32 mm de diámetro

Sensibilidad de microcurvatura a 1550, 1625 nm  $\leq$  2, 4 (dB/km)/(g/mm).

- 60 **[0099]** La figura 9 muestra el perfil del índice de refracción de otro ejemplo de una fibra óptica 20 según la presente invención. Los parámetros de la diferencia del índice de refracción y el radio de las capas de vidrio 22, 24, 26 y 28 se muestran en la figura 9. La fibra óptica de esta realización es un perfil en W "puro" sin pico positivo o negativo externo. En esta fibra, el núcleo está rodeado solamente por un tramo de índice de refracción negativo, seguido de una amplia región de sílice puro. En particular, el núcleo tiene una diferencia del índice de refracción

máxima de aproximadamente 0,0107 a través de un radio de aproximadamente 2,164  $\mu\text{m}$ . El tramo es de aproximadamente 1,448  $\mu\text{m}$  de ancho, con una diferencia del índice de refracción máxima de aproximadamente -0,0017.

- 5 **[0100]** La realización específica de la fibra 20 que se ilustra en la Figura 9 tiene las siguientes características de transmisión óptica, que se han generado a través de simulaciones por ordenador:

Corte teórico LP11 = 906,4 nm

Corte teórico LP02 = 563,4 nm

Dispersión en 1450; 1550; 1625 nm = -7,19; -3,29; -0,78 ps/nm/km

- 10 Pendiente de dispersión en 1450; 1550; 1625 nm = 0,043, 0,035, 0,032 ps/nm<sup>2</sup>/km

Diámetro de campo modal en 1450; 1550; 1625 nm = 6,3; 6,8; 7,3  $\mu\text{m}$

Área efectiva en 1450, 1550, 1625 nm = 29,9, 34,9, 39,6  $\mu\text{m}^2$

Coefficiente de no linealidad  $\gamma$  en 1450; 1550; 1625 nm = 3,52, 2,63, 2,09 W<sup>-1</sup> km<sup>-1</sup>

Atenuación de macrocurvatura en 1550; 1625 nm  $\leq$  0,5; 1,0 dB para un bucle de 32 mm de diámetro

- 15 Sensibilidad de microcurvatura a 1550, 1625 nm  $\leq$  1, 3 (dB/km)/(g/mm).

- 20 **[0101]** El diseño de la fibra B limita los efectos perjudiciales asociados típicamente con bombeo Raman como retrodispersión simple o doble. Además, una dispersión moderada se obtiene en el segundo tramo de fibra al limitar la cantidad de dopante menores, tales como flúor o similares. Como resultado, un perfil del índice de refracción de la fibra B se caracteriza por diferencias del índice de refracción moderadas entre las capas adyacentes, lo que reduce la dispersión. La dispersión puede reducirse aún más mediante la reducción de la pendiente de las discontinuidades del índice entre las capas adyacentes. Por ejemplo, las discontinuidades a modo de escalones se pueden sustituir por índice de secciones de índice graduado, para proporcionar una conexión fluida entre los segmentos de perfil adyacente. En una realización preferida, el perfil del índice de refracción de la fibra B también tiene una concentración moderada de un dopante superior, tal como GeO<sub>2</sub> o similares. Esta solución corresponde a una dispersión cromática a 1550 nm por encima de aproximadamente -8 ps/nm/km y reduce aún más la dispersión y la dispersión acumulada. Además, la profundidad limitada del índice de la capa rebajado en el perfil del índice de refracción ayuda a reducir la criticidad de control industrial de los parámetros del índice de refracción, tal como el radio del núcleo interno. Esta solución es, pues, industrialmente ventajosa, ya que mitiga los requisitos para las tolerancias industriales. Finalmente, la invención proporciona una atenuación de enlace total moderada, debido al hecho de que el segundo tramo de fibra tiene un coeficiente de atenuación moderado y que la pérdida del empalme es limitada, cuando el segundo tramo de fibra se empalma a un primer tramo de fibra elegido entre los comúnmente utilizados para la transmisión óptica.

- 35 **[0102]** Será evidente para los expertos en la materia que varias modificaciones y variaciones se pueden hacer en el proceso y el producto descritos sin apartarse del alcance de la invención. Otras realizaciones de la invención serán evidentes para los expertos en la materia a partir de la consideración de la memoria y la práctica de la invención aquí descrita. Se pretende que la memoria y los ejemplos se consideren como de ejemplo solamente, con un verdadero alcance de la invención que se indica en las siguientes reivindicaciones.

40

## REIVINDICACIONES

1. Enlace de transmisión de fibra óptica (10), que comprende:  
 5 una primera fibra óptica que tiene una primera área efectiva superior a  $45 \mu\text{m}^2$ ; y  
 una segunda fibra óptica (20) acoplada después de la primera fibra óptica, que tiene una segunda área efectiva menor que la primera fibra óptica, un valor absoluto de dispersión entre aproximadamente 2 y 20 ps/nm/km en 1550 nm, un valor absoluto de pendiente de dispersión menor de aproximadamente 0,040 ps/nm<sup>2</sup>/km en 1550 nm, y un coeficiente de atenuación en 1550 nm menor de aproximadamente 0,24 dB/km en 1450 nm menor de aproximadamente 0,30 dB/km,
- 10 **caracterizado por el hecho de que** la segunda fibra óptica (20) comprende
- 15 - un núcleo de vidrio que incluye un núcleo interno (22) que tiene una primera diferencia del índice de refracción  $\Delta n_1$  entre aproximadamente 0,008 y 0,014 y una primera capa (24) que rodea radialmente el núcleo interno (22) a lo largo de la longitud de la fibra y que tiene una segunda diferencia del índice de refracción  $\Delta n_2$  de entre aproximadamente -0,0005 y -0,0030 y  
 - un revestimiento de vidrio (29) que rodea el núcleo de vidrio y que tiene una diferencia del índice de refracción  $\Delta n_{\text{CL}}$  substancialmente igual a 0.
- 20 2. Enlace de transmisión de fibra óptica (10) según la reivindicación 1, que también comprende:  
 una fuente de bombeo acoplada para proporcionar una luz de bombeo a través de la segunda fibra óptica 20 y formando la segunda fuente de bombeo un amplificador Raman distribuido.
- 25 3. Enlace de transmisión de fibra óptica (10) según la reivindicación 2, en donde la fuente de bombeo se acopla a la luz de bombeo en el enlace después de las segundas fibras ópticas (20).
4. Enlace de transmisión de fibra óptica (10) según la reivindicación 2, en el que la fuente de bombeo se acopla con la luz de bombeo en el enlace antes de la segunda fibra óptica (20).
- 30 5. Enlace de transmisión de fibra óptica (10) según la reivindicación 1, en el que la dispersión de la segunda fibra óptica (20) en 1550 nm está entre aproximadamente -2 y -20 ps/km/nm.
- 35 6. Enlace de transmisión de fibra óptica (10) según la reivindicación 5, en el que la dispersión de la segunda fibra óptica (20) en 1550 nm es entre aproximadamente -3 y -8 ps/km/nm.
7. Enlace de transmisión de fibra óptica (10) según la reivindicación 6, en el que la dispersión de la segunda fibra óptica (20) en 1625 nm es menor o igual a aproximadamente -0,1 ps/km/nm.
- 40 8. Enlace de transmisión de fibra óptica (10) según la reivindicación 1, en el que la segunda fibra óptica (20) tiene una atenuación de macrocurvatura de un bucle de más de 32 mm de mandril menor de aproximadamente 0,5 dB en 1550 nm y menor de aproximadamente 1,0 dB en 1625 nm.
- 45 9. Enlace de transmisión de fibra óptica (10) según la reivindicación 1, en el que la segunda fibra óptica (20) tiene un diámetro de campo modal en 1550 nm menor de 7,6  $\mu\text{m}$ .
10. Enlace de transmisión de fibra óptica (10) según la reivindicación 1, en el que la segunda fibra óptica (20) tiene una longitud de onda de cable cortado entre 1250 y 1450 nm.
- 50 11. Enlace de transmisión de fibra óptica (10) según la reivindicación 1, en el que la primera fibra óptica es una fibra de dispersión positiva no cero.
12. Enlace de transmisión de fibra óptica (10) según la reivindicación 1, en el que la primera fibra óptica es una fibra de dispersión negativa no cero.
- 55 13. Procedimiento para transmitir una pluralidad de señales ópticas multiplexadas de división de longitud de onda a través de una larga distancia, que comprende:
- 60 transmitir las señales ópticas a lo largo de una primera fibra óptica que tiene una primera área efectiva mayor de  $45 \mu\text{m}^2$ ;  
 transmitir las señales a lo largo de una segunda fibra óptica (20) con una segunda área efectiva menor que la primera fibra óptica, un valor absoluto de dispersión de entre aproximadamente 2 y 20 ps/nm/km en 1550 nm, un valor absoluto de la pendiente de dispersión menor de aproximadamente 0,040 ps/nm<sup>2</sup>/km en 1550 nm, y un coeficiente de atenuación en 1550 nm menor de aproximadamente 0,24 dB/km en 1450 nm

menor de aproximadamente 0,30 dB/km;

acoplar una luz de bombeo en la segunda fibra (20) para proporcionar una amplificación Raman distribuida de dichas señales ópticas

5 **caracterizado por el hecho de que** la segunda fibra óptica (20) tiene

- un núcleo de vidrio que incluye un núcleo interno (22) que tiene una primera diferencia del índice de refracción  $\Delta n_1$  entre aproximadamente 0,008 y 0,014 y una primera capa (24) que rodea radialmente el núcleo interno (22) a lo largo de la longitud de la fibra y que tiene una segunda diferencia del índice de refracción  $\Delta n_2$  de entre aproximadamente -0,0005 y -0,0030, y

10 - un revestimiento de vidrio (29) que rodea el núcleo de vidrio y que tiene una diferencia del índice de refracción  $\Delta n_{CL}$  substancialmente igual a 0.

15 **14.** Fibra óptica (20) para una amplificación Raman y una transmisión de longitudes de onda mejoradas que incluye la banda C, teniendo la fibra óptica (20) un diámetro de campo modal en 1550 nm menor de aproximadamente 7,6  $\mu\text{m}$ , una atenuación, un coeficiente en 1550 nm menor de aproximadamente 0,24 dB/km en 1450 nm menor de aproximadamente 0,30 dB/km, un valor absoluto de dispersión en 1550 nm entre aproximadamente 2 y 20 ps/nm/km, y un valor absoluto de la pendiente de dispersión en 1550 nm menor de aproximadamente 0,040 ps/nm<sup>2</sup>/km, **caracterizada por el hecho de que** comprende:

un núcleo de vidrio que incluye:

un núcleo interno (22) que tiene una primera diferencia del índice de refracción  $\Delta n_1$  entre aproximadamente 0,008 y 0,014; y

25 una primera capa (24) que rodea radialmente el núcleo interno (22) a lo largo de la longitud de la fibra y que tiene una segunda diferencia del índice de refracción  $\Delta n_2$  de entre aproximadamente -0,0005 y -0,0030, y

un revestimiento de vidrio (29) que rodea el núcleo de vidrio y que tiene una diferencia del índice de refracción  $\Delta n_{CL}$  substancialmente igual a 0.

30 **15.** Fibra óptica (20) según la reivindicación 14, en la que  $\Delta n_1$  es entre aproximadamente 0,009 y 0,012.

**16.** Fibra óptica (20) según la reivindicación 14, en la que  $\Delta n_2$  es entre aproximadamente 0,0010 y -0,0025.

35 **17.** Fibra óptica (20) según la reivindicación 14, que también comprende una segunda capa (26) que rodea radialmente la primera capa (24) a lo largo de la longitud de la fibra (20) y que tiene una tercera diferencia del índice de refracción  $\Delta n_3$  mayor que 0.

40 **18.** Fibra óptica según la reivindicación 17, en la que  $\Delta n_3$  es menor de aproximadamente 0,006.

**19.** Fibra óptica (20) según la reivindicación 17, que también comprende una tercera capa (28) que rodea radialmente la segunda capa (26) a lo largo de la longitud de la fibra (20) y que tiene una cuarta diferencia del índice de refracción  $\Delta n_4$  menor que 0.

45 **20.** Preforma de fibra óptica para realizar una fibra óptica (20) para amplificación Raman y transmisión de longitudes de onda mejoradas que incluye la banda C, comprendiendo la preforma:

- un núcleo de vidrio que incluyendo:

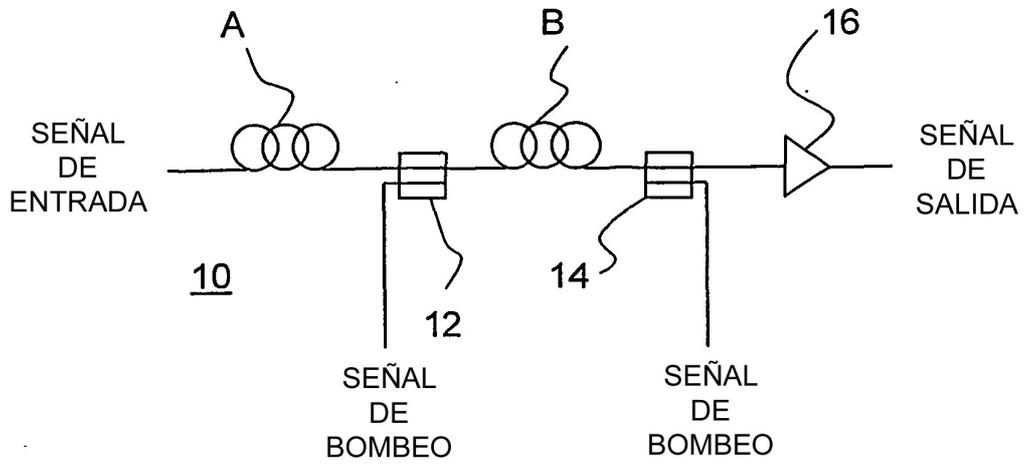
un núcleo interno (22) que tiene una primera anchura y una primera diferencia del índice de refracción  $\Delta n_1$  entre aproximadamente 0,008 y 0,014; y

una primera capa (24) que rodea radialmente el núcleo interno (22) a lo largo de la longitud de la fibra y que tiene una segunda anchura y una segunda diferencia del índice de refracción  $\Delta n_2$  de entre aproximadamente -0,0005 y -0,0030, y

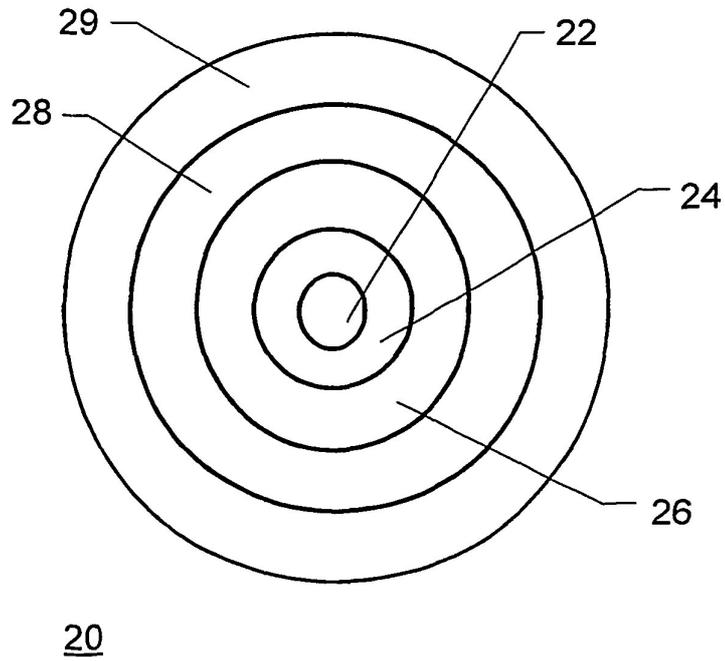
55 - un revestimiento de vidrio (29) que rodea el núcleo de vidrio y tiene una tercera anchura y una diferencia del índice de refracción  $\Delta n_{CL}$  substancialmente igual a 0;

en donde el núcleo se selecciona de modo que la fibra realizada (20) tiene un diámetro de campo modal en 1550 nm menor de 7,6  $\mu\text{m}$ , un coeficiente de atenuación en 1550 nm menor de aproximadamente 0,24 dB/km en 1450 nm menor de aproximadamente 0,30 dB/km, un valor absoluto de dispersión en 1550 nm entre aproximadamente 2 y 20 ps/nm/km, y un valor absoluto de la pendiente de dispersión en 1550 nm menor de aproximadamente 0,040 ps/nm<sup>2</sup>/km.

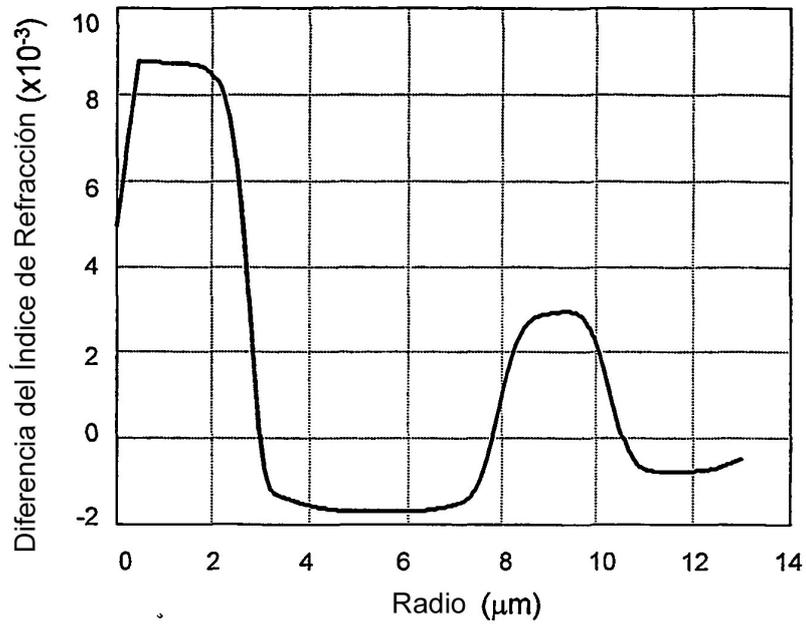
60



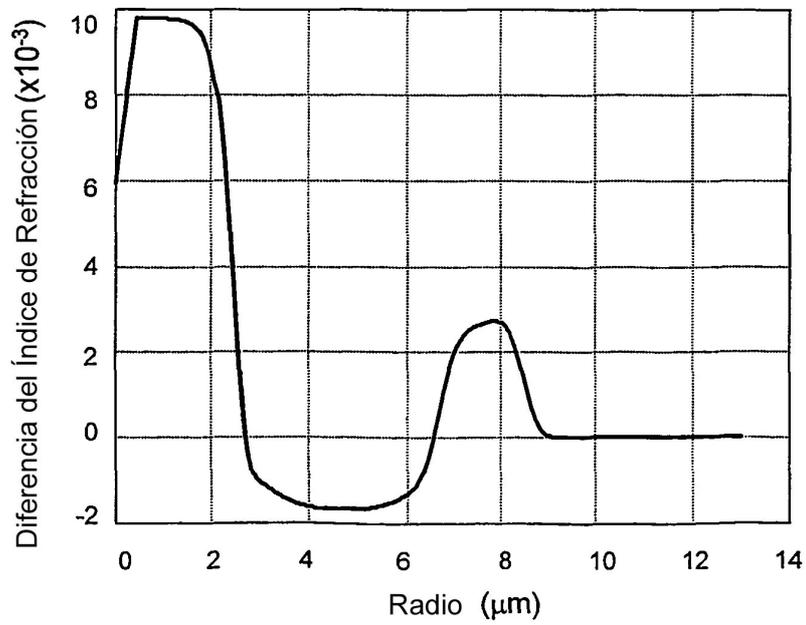
**FIG. 1**



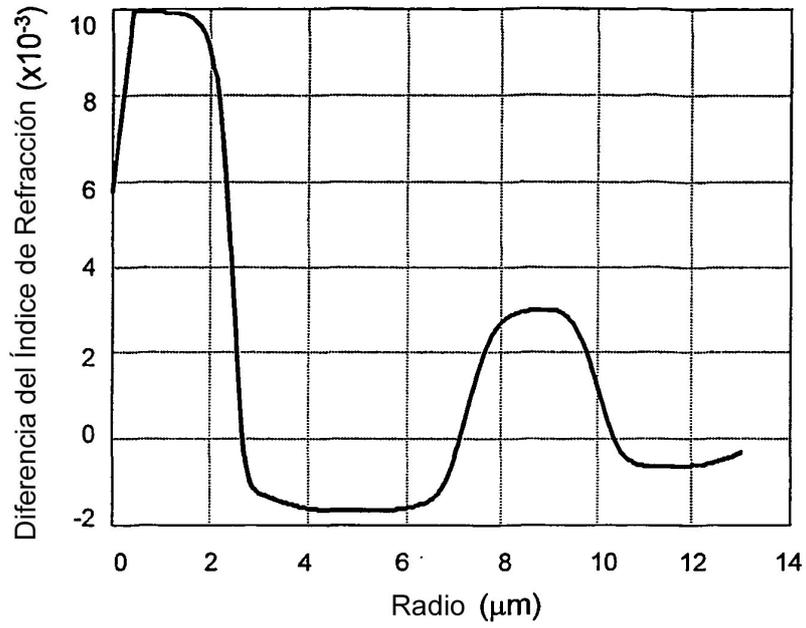
**FIG. 2**



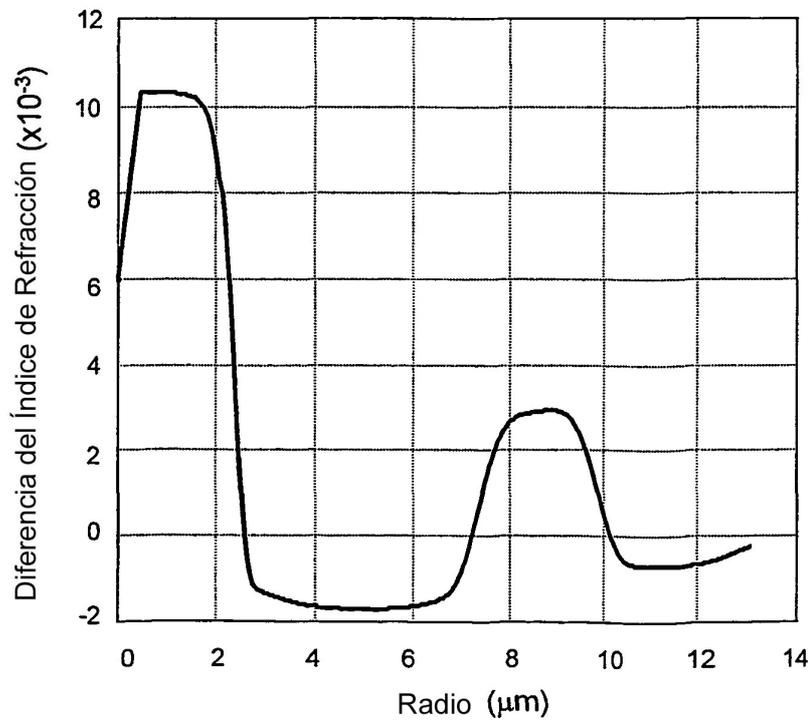
**FIG. 3**



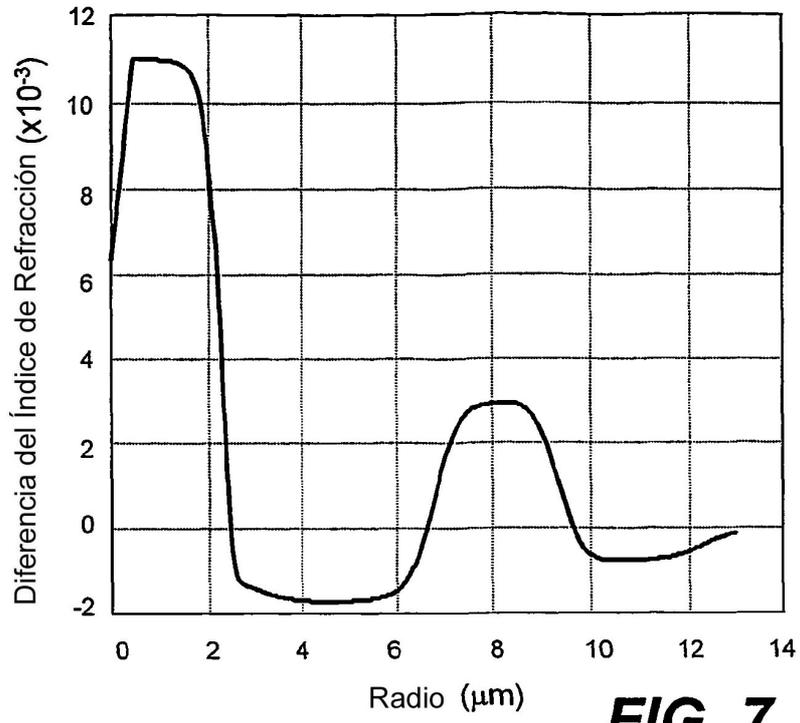
**FIG. 4**



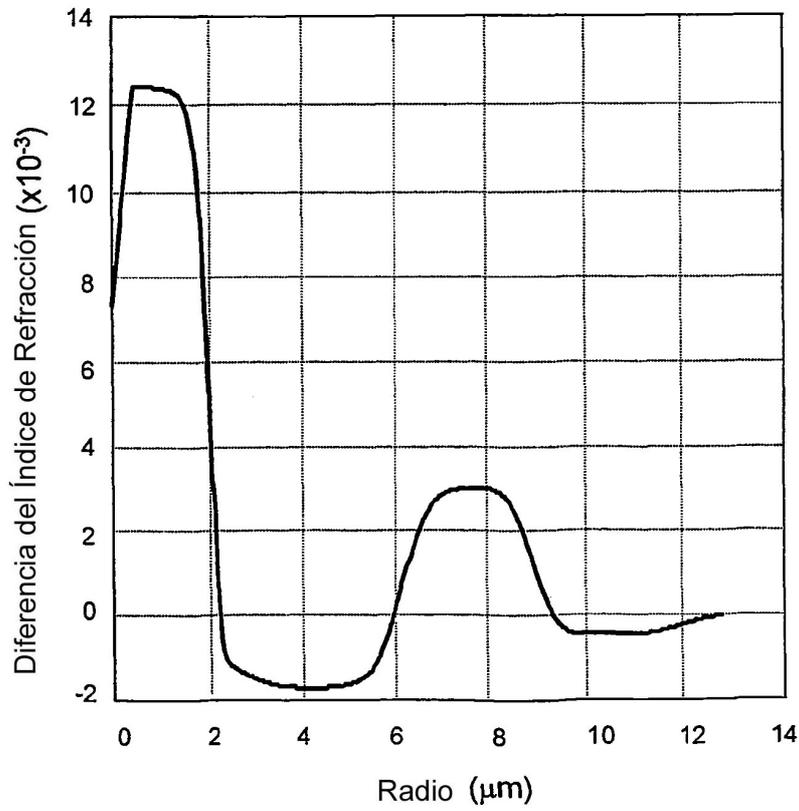
**FIG. 5**



**FIG. 6**



**FIG. 7**



**FIG. 8**

