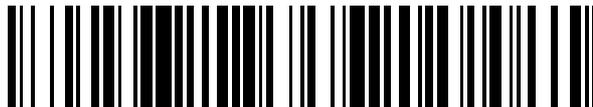


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 370 702**

51 Int. Cl.:
G02B 6/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **01915311 .3**
96 Fecha de presentación: **01.03.2001**
97 Número de publicación de la solicitud: **1259840**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **27.11.2002**

54 Título: **FIBRA ÓPTICA PARA LA TRANSMISIÓN POR WDM.**

30 Prioridad:
03.03.2000 EP 00104646
10.03.2000 US 188166 P

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
22.12.2011

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
22.12.2011

73 Titular/es:
PRYSMIAN S.P.A.
VIALE SARCA 222
20126 MILANO, IT

72 Inventor/es:
TIRLONI, Bartolomeo, Italo

74 Agente: **Carpintero López, Mario**

ES 2 370 702 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Fibra óptica para la transmisión por WDM

Antecedentes de la invención

5 La presente invención versa en general acerca de una fibra óptica para la transmisión en múltiples longitudes de onda. Además, la presente invención versa acerca de un aparato y un procedimiento para reducir la atenuación total y los efectos no lineales asociados con la transmisión óptica a larga distancia.

10 En los sistemas mundiales de comunicaciones de la actualidad, es a menudo necesario extender una línea de transmisión a larga distancia, lo que puede incluir un cuerpo de agua, para proporcionar un enlace de comunicaciones entre un transmisor y un receptor. La tendencia actual en los sistemas de comunicaciones es usar fibras ópticas para fabricar estas líneas de transmisión. Se prefieren las fibras ópticas porque las fibras pueden transmitir un gran número de señales digitales con una tasa elevada de transmisión de datos.

15 Para mejorar más la capacidad de transporte de señales de la línea de transmisión, pueden usarse fibras ópticas con tecnología de multiplexado con división en longitud de onda (WDM). Esta tecnología permite enviar múltiples señales ópticas por la misma fibra en canales con longitudes de onda estrechamente separadas. Esto mejora enormemente la capacidad de transporte de información del sistema de transmisión en su conjunto.

20 Se encuentran varios problemas cuando se usan fibras ópticas para transmitir señales a distancia considerable. Por ejemplo, la potencia de la señal óptica disminuye a menudo que la señal viaja por cada fibra. Esta pérdida de potencia, también denominada atenuación, puede ser compensada incluyendo amplificadores a lo largo de la línea de transmisión para aumentar la potencia de la señal. La colocación y el número de los amplificadores a lo largo de la línea de transmisión se determinan en parte por la atenuación de la fibra óptica. Obviamente, una señal enviada a través de una fibra con una atenuación baja requiere menos amplificadores que una señal enviada por una fibra con mucha atenuación.

25 La dispersión cromática es otro problema encontrado cuando se transmiten señales por fibras ópticas. La dispersión cromática, en lo sucesivo denominada "dispersión", surge porque la fibra óptica transmite los diferentes componentes espectrales de un impulso óptico a velocidades diferentes, lo que puede llevar a la dispersión o ensanchamiento de un impulso óptico a medida que viaja por la línea de transmisión. Cada fibra óptica tiene un valor de dispersión que varía en función de la longitud de onda de la señal óptica y surge de la composición material de la fibra óptica de vidrio y de las características del guíaondas. La dispersión dentro de la fibra óptica a una longitud de onda dada puede ser positiva, negativa o cero, dependiendo de las características de transmisión de la fibra. A pesar del tipo de dispersión (positiva o negativa), las cantidades excesivas pueden llevar a errores de detección en el receptor de la señal óptica.

30 Transmitir señales a la longitud de onda de dispersión cero de una fibra casi eliminará el problema de la dispersión, pero puede agravar otros problemas de transmisión, particularmente los efectos no lineales usados con los sistemas de WDM. Un efecto no lineal particularmente relevante en los sistemas de WDM es el fenómeno de la mezcla de cuatro ondas (FWM). Se da la FWM cuando al menos dos señales que verifican condiciones de coincidencia de fase son enviadas por la misma fibra (como en los sistemas de WDM) e interactúan generando nuevas longitudes de onda. en el caso de los sistemas de WDM que tienen un gran número de canales (más de dos) separados por igual, estas nuevas longitudes de onda acabarán solapándose con las longitudes de onda de la señal, degradando así la relación señal-ruido. Es sabido que los sistemas de WDM que tienen una longitud de onda operativa diferente de la longitud de onda de dispersión cero de la fibra de la transmisión (y, por lo tanto, tienen un valor de dispersión distinto de cero a la longitud de onda operativa) minimizan la degradación de la FWM. Más precisamente, la eficiencia η de la FWM, definida como la proporción entre la potencia de la FWM y la potencia de salida por canal (suponiendo una potencia de entrada igual para todos los canales), es aproximadamente proporcional a:

$$\eta \propto \left[\frac{n_2 \alpha}{A_{\text{efi}} D (\Delta \lambda)^2} \right]^2$$

45 siendo α la atenuación de la fibra, siendo n_2 el índice de refracción no lineal, siendo A_{efi} el área efectiva de la fibra, siendo D la dispersión y siendo $\Delta \lambda$ la separación de canales. La anterior aproximación es válida bajo la condición $\alpha \ll \Delta \beta$, siendo $\Delta \beta = (2\pi c/\lambda^2) \cdot D \cdot \Delta \lambda^2$, siendo c la velocidad de la luz y λ la longitud de onda de la transmisión. Véase D. W. Peckham, A. F. Judy y R.B. Kummer, ECOC '98, monografía TuA06, pp. 139-140. Como puede verse, para un conjunto dado de valores para $\Delta \lambda$, n_2 y α , para disminuir la eficiencia de la FWM puede aumentarse el valor absoluto de la dispersión y/o aumentar el valor del área efectiva de la fibra A_{efi} . Por otra parte, disminuir drásticamente la separación de canales aumenta la eficiencia de la FWM.

Otros efectos no lineales incluyen la automodulación de fase, la modulación de fase cruzada, la dispersión estimulada de Brillouin (SBS) y la dispersión de Raman (SRS). Es bien conocido que una fibra con un área efectiva mayor a la longitud de onda operativa es menos susceptible a todos los efectos no lineales.

5 Para solucionar la dispersión y los efectos no lineales asociados con el envío de señales a través de fibras ópticas largas, los sistemas convencionales usan líneas de transmisión que conectan tramos de fibra óptica que tienen valores de dispersión alternos. Por ejemplo, un tramo de fibra de dispersión negativa puede ir seguido por un tramo de fibra de dispersión positiva para equilibrar la dispersión global en la línea de transmisión. Este enfoque garantiza que la dispersión sea distinta de cero en los valores locales a lo largo de la línea de transmisión para evitar los efectos no lineales y que la dispersión total en la línea de transmisión acumulativa se compense hasta casi cero en el receptor.

Diversas publicaciones presentan diferentes enfoques para resolver estos problemas. Por ejemplo, la patente estadounidense nº 4.969.710, de Tick et al., expone una vía de transmisión de fibra óptica en la que la dispersión total del sistema se compensa por medio del uso de fibras compuestas de vidrios con una dispersión total de signos opuestos a la longitud de onda operativa para el sistema.

15 La patente estadounidense nº 5.343.322, de Pirio et al., expone un sistema para la transmisión de una señal digital a larga distancia. El sistema usa una fibra óptica que tiene una dispersión negativa baja para conectar estaciones receptoras que incluyen dispositivos de compensación de la dispersión que tienen dispersiones positivas para compensar la dispersión negativa.

20 La patente estadounidense nº 5.559.920, de Chraplyvy et al., expone un sistema óptico de comunicaciones que tiene un tramo inicial con una fuerte dispersión negativa seguido por tramos de dispersión positiva. El sistema compensa en demasía la dispersión negativa, porque el valor final de la dispersión no es cero.

Otras publicaciones, como la patente estadounidense nº 5.587.830, de Chraplyvy et al., la patente estadounidense nº 5.719.696, de Chraplyvy et al., la patente estadounidense nº 5.675.429, de Henmi et al., y la patente estadounidense nº 5.778.128, de Wildeman, también presentan línea de transmisión para sistemas de largo alcance. Estas publicaciones dan a conocer líneas de transmisión que usan combinaciones variadas de fibra que tienen ya sea una dispersión negativa o una dispersión positiva a la longitud de onda operativa. La fibra de dispersión negativa y la fibra de dispersión positiva están dispuestas de modo que la dispersión total del sistema se compense hasta aproximadamente cero.

30 De forma similar, la patente del Reino Unido nº 2 268 018 también presenta un sistema de transmisión óptica que combina fibra óptica que tiene dispersión negativa con fibra que tiene dispersión positiva para compensar la dispersión hasta cero para la longitud total de la transmisión.

35 La solicitud de patente europea nº 0 790 510 A2 presenta un cable óptico simétrico de fibra con gestión de la dispersión. El cable de esta revelación incluye una fibra convencional monomodo que tiene una dispersión positiva a la longitud de onda operativa conectada a una segunda fibra óptica que tiene una dispersión negativa a la longitud de onda operativa.

40 La patente estadounidense nº 5.611.016, de Fangmann et al., da a conocer un cable óptico de fibra de dispersión equilibrada. El cable incluye fibras monomodo que tienen dispersión opuesta a la longitud de onda operativa. Un sistema de WDM interconecta dos cables de dispersión equilibrada con una conexión cruzada entre la fibra de dispersión positiva de un cable y la fibra de dispersión negativa del otro cable. Según esta patente, se logra un rendimiento mejorado cuando el valor absoluto de la dispersión cromática de las fibras monomodo a una longitud de onda de 1550 nm está en el intervalo de 0,8 - 4,6 ps/nm/km.

45 S. Bigo et al., en la monografía "1.5 Terabit/s WDM transmission of 150 channels at 10 Gbit/s over 4x100 km of TeraLight™ fibre", PD2-9, pp. 40-41, ECOC'99, dan a conocer una línea de transmisión en la que cuatro tramos de 100 km de fibra que tienen una dispersión cromática media de +8 ps/nm/km, una pendiente de dispersión de 0,057 ps/nm²/km y una atenuación de 0,205 dB/km están intercalados con amplificadores ópticos que incluyen fibras compensadoras de la dispersión (DCF). Los solicitantes han determinado, en base a los datos proporcionados en la monografía, que la longitud de onda de dispersión cero de la fibra TeraLight™ dada a conocer es menor de 1440 nm.

50 El documento US 4 852 968 da a conocer una fibra óptica monomodo que tiene un perfil de índice de refracción con una región de índice deprimido o de trinchera en la región del revestimiento. El documento US 4 852 968 afirma que, regulando de forma adecuada la posición, la anchura y el índice de la región de trinchera, pueden ser mejoradas una o más características de la fibra.

55 El documento WO 99/26094 da a conocer una fibra óptica monomodo que tiene un diseño de alma segmentada. El documento WO 99/26094 afirma que, mediante una debida elección del perfil del índice de cada segmento, se fabrica un guíaondas con un diámetro de campo modal de aproximadamente 9,5, una dispersión baja positiva total sobre la ventana operativa de 1530-1565 nm, así como un área efectiva mayor que 60 μm².

El documento US 5 905 838 da a conocer un diseño de fibra que permite la operación simultánea de WDM denso en ventanas de transparencia tanto de 1310 nm como de 1550 nm. El diseño permite valores de dispersión en ambas ventanas suficientemente bajos para la tasa de bits deseada por canal y, a la vez, suficientemente altos para mantener los efectos de la dispersión no lineal dentro de los límites tolerables para las operaciones de WDM.

- 5 El documento EP 0 992 817 da a conocer una fibra óptica que tiene un área efectiva mayor de $100 \mu\text{m}^2$, una diferencia pico del índice de refracción de 0,0137, una longitud de onda de dispersión cero de 1475 nm, un valor de dispersión de 8 ps/nm/km a una longitud de onda operativa de 1550 nm, una longitud de onda límite del cable de menos de 1500 nm.

- 10 El documento WO 98/49568 da a conocer una fibra guíaondas con gestión de la dispersión compuesta de tramos que tienen una dispersión de signo positivo o negativo. Los tramos de dispersión positiva tienen un perfil de salto de índice en el índice de refracción, una baja pendiente de dispersión y un área efectiva elevada, por ejemplo de $100 \mu\text{m}^2$ a 1550 nm.

P. Nouchi ("Maximum effective area for non-zero dispersion shifted fiber", OFC '98 Technical Digest, páginas 303-304) se centra en cuestiones de diseño para las fibras NZ-DSF con grandes áreas efectivas.

- 15 Los solicitantes han hecho notar que estas disposiciones anteriores usan combinaciones de fibra óptica que dan como resultado niveles de atenuación indeseablemente elevados.

Los solicitantes se han enfrentado a la tarea de proporcionar una fibra óptica para ser usada en líneas de transmisión de WDM denso e hiperdenso que reduzca los efectos no lineales y que, a la vez, minimice la atenuación y logre una dispersión razonable.

20 **Resumen de la invención**

En general, la presente invención involucra una fibra óptica, una línea de transmisión óptica y un sistema de transmisión óptica y un procedimiento para transmitir señales ópticas a una distancia significativa. En particular, la invención involucra un aparato y un procedimiento para reducir la atenuación y los efectos no lineales asociados con la transmisión óptica.

- 25 Según el propósito de la invención según se plasma y se describe en términos generales en el presente documento, la invención está dirigida a una fibra monomodo de transmisión óptica. La fibra incluye un alma y un revestimiento. El alma comprende un alma interior y tiene una primera diferencia del índice de refracción y una primera capa de vidrio que rodea el alma interior y que tiene una segunda diferencia del índice de refracción. La fibra tiene una diferencia pico del índice de refracción menor o igual a aproximadamente 0,0140, una longitud de onda de dispersión cero mayor que 1450 nm y menor que 1500 nm, un valor de dispersión entre aproximadamente 6 y 11 ps/nm/km a una longitud de onda operativa de aproximadamente 1560 nm y un área efectiva de al menos $60 \mu\text{m}^2$. La fibra tiene una longitud de onda límite del cable de menos de aproximadamente 1500 nm.

Ventajosamente, la fibra está alojada dentro de un cable de fibra óptica.

- 35 Los solicitantes han hecho notar que la anterior combinación de una dispersión entre aproximadamente 6 ps/nm/km y 11 ps/nm/km a la longitud de onda operativa y una longitud de onda de dispersión cero entre 1450 nm y 1500 nm, aunque dé como resultado una degradación reducida de FWM, permite lograr un valor relativamente elevado de la pendiente de dispersión. Los solicitantes han hecho notar, además, que una pendiente elevada de la dispersión corresponde en general a valores relativamente elevados del área efectiva, que está asociada con una disminución beneficiosa de los efectos no lineales a lo largo de la fibra. En consecuencia, la fibra es particularmente ventajosa para la transmisión de WDM denso e hiperdenso.

Preferentemente, la longitud de onda de dispersión cero de la fibra está entre aproximadamente 1460 y 1490 nm.

El alma de la fibra está libre de capas de diferencia negativa del índice de refracción.

Preferentemente, la fibra tiene una pendiente de dispersión igual o mayor que aproximadamente $0,06 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ y, aún más preferentemente, igual o mayor que aproximadamente $0,07 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$.

- 45 Preferentemente, la fibra tiene un área efectiva igual o mayor que aproximadamente $65 \mu\text{m}^2$, más preferentemente igual o mayor que aproximadamente $70 \mu\text{m}^2$.

El área efectiva de la fibra está limitada, por ejemplo, a menos de aproximadamente $87 \mu\text{m}^2$ para lograr la compatibilidad con las fibras preexistentes. Tal límite superior del área efectiva de la fibra también da la ventaja de una sensibilidad limitada al doblado para la fibra a longitudes de onda por encima de 1600 nm.

- 50 Ventajosamente, la fibra puede tener una atenuación inferior a aproximadamente 0,210 dB/km a una longitud de onda de 1560 nm, preferentemente inferior a aproximadamente 0,205 dB/km y, aún más preferentemente, igual o menor que aproximadamente 0,200 dB/km.

Preferentemente, la dispersión de la fibra está entre aproximadamente 7 ps/nm/km y 10 ps/nm/km a una longitud de onda de 1560 nm.

5 En una primera realización de la fibra, la primera diferencia del índice de refracción y la segunda diferencia del índice de refracción son mayores de cero, siendo la segunda diferencia del índice de refracción menor que la primera diferencia del índice de refracción.

Preferentemente, la primera diferencia del índice de refracción está en el intervalo de aproximadamente 0,0100 a 0,0140 y la segunda diferencia del índice de refracción está en el intervalo de aproximadamente 0,0005 a 0,0030.

10 En una segunda realización, la fibra comprende una segunda capa de vidrio que rodea la primera capa de vidrio y que tiene una tercera diferencia del índice de refracción. La primera diferencia del índice de refracción es mayor que cero, la segunda diferencia del índice de refracción es aproximadamente cero y la tercera diferencia del índice de refracción es mayor que cero. Preferentemente, la primera diferencia del índice de refracción está entre aproximadamente 0,0090 y 0,0130 y la tercera diferencia del índice de refracción está entre aproximadamente 0,0020 y 0,0080.

15 En otro aspecto, la invención está dirigida a una línea de transmisión óptica que incluye tramos primero y segundo de fibra monomodo. La fibra del primer tramo tiene una dispersión negativa a una longitud de onda operativa. El segundo tramo está conectado al primer tramo y tiene una dispersión positiva a la longitud de onda operativa. La dispersión positiva del segundo tramo compensa la dispersión negativa del primer tramo, de modo que la dispersión acumulada en los tramos primero y segundo es aproximadamente cero.

20 La fibra del segundo tramo es una fibra de dispersión desplazada a la mitad que tiene una longitud de dispersión cero mayor que 1450 nm y menor que 1500 nm. La dispersión positiva del segundo tramo está entre aproximadamente 6 ps/nm/km y 11 ps/nm/km a la longitud de onda operativa.

Preferentemente, la longitud de onda operativa es de aproximadamente 1560 nm.

Ventajosamente, la proporción entre la longitud del primer tramo y la longitud del segundo tramo es menor de aproximadamente 6:1, preferentemente menos de aproximadamente 4:1.

25 Preferentemente, la dispersión positiva de la fibra de dispersión desplazada a la mitad está entre aproximadamente 7 ps/nm/km y 10 ps/nm/km a la longitud de onda operativa.

Preferentemente, el área efectiva para la fibra del segundo tramo es mayor que $60 \mu\text{m}^2$, más preferentemente mayor que $65 \mu\text{m}^2$, aún más preferentemente mayor que $70 \mu\text{m}^2$.

30 El área efectiva de la fibra está limitada, por ejemplo, a menos de aproximadamente $87 \mu\text{m}^2$ para lograr la compatibilidad con fibras preexistentes.

Preferentemente, la fibra de dispersión desplazada a la mitad tiene una atenuación inferior a aproximadamente 0,210 dB/km a la longitud de onda operativa, más preferentemente inferior a aproximadamente 0,205 dB/km y, aún más preferentemente, igual o inferior a aproximadamente 0,200 dB/km.

El alma de la fibra está libre de capas de diferencia negativa del índice de refracción.

35 Preferentemente, la fibra de dispersión desplazada a la mitad tiene una pendiente de dispersión igual o mayor que aproximadamente $0,06 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ y, aún más preferentemente, igual o mayor que aproximadamente $0,07 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$.

40 Según una realización, el primer tramo de fibra de dispersión negativa puede ser una fibra con compensación de la dispersión que tenga una dispersión negativa en el intervalo de -300 a -50 ps/nm/km, preferentemente en la configuración de un módulo compacto. Ventajosamente, la fibra con compensación de la dispersión tiene una pendiente de dispersión negativa.

45 Según otra realización, el primer tramo de fibra de dispersión negativa puede ser una fibra que tenga una dispersión negativa muy elevada en el intervalo de -50 a -10 ps/nm/km, ya sea cableada o en una configuración de módulos compactos. Ventajosamente, la fibra de dispersión negativa muy elevada tiene una pendiente de dispersión negativa.

Según otra realización adicional, el primer tramo de fibra de dispersión negativa puede ser una fibra que tenga una dispersión negativa muy elevada en el intervalo de -10 a -2 ps/nm/km, preferentemente en el intervalo de -8 a -4 ps/nm/km, preferentemente en una configuración de cable. La fibra de dispersión negativa puede tener una pendiente de dispersión negativa.

Los solicitantes han determinado que la selección y la disposición de fibras ópticas para la línea de transmisión óptica de la invención llevan a una atenuación mejorada y a menores efectos no lineales que en una línea de transmisión convencional.

5 Típicamente, la línea de transmisión óptica está dotada de un dispositivo transmisor acoplado a un extremo de la línea de transmisión y de un dispositivo receptor acoplado al otro extremo. El dispositivo transmisor envía señales al dispositivo receptor por la línea de transmisión.

10 Puede transmitirse una señal por la línea de transmisión de la invención según el siguiente procedimiento. El procedimiento incluye la etapa de añadir la señal a la línea de transmisión. La señal es transmitida por un primer tramo de fibra óptica monomodo que tiene una dispersión negativa a una longitud de onda operativa. A continuación, la señal es guiada por un segundo tramo de fibra óptica monomodo que tiene una dispersión positiva a la longitud de onda operativa para compensar la dispersión negativa del primer tramo. El segundo tramo de fibra compensa la dispersión total por la línea de transmisión hasta aproximadamente cero. Acto seguido, se elimina la señal de la línea de transmisión.

15 Ventajosamente, la señal es añadida a la línea de transmisión con un dispositivo transmisor. Ventajosamente, la señal se elimina de la línea de transmisión con un dispositivo receptor.

Otras características preferentes y ventajosas del procedimiento de transmisión de una señal por una línea de transmisión pueden derivarse de las características preferentes y ventajosas correspondientes de la línea de transmisión óptica de la invención, según son descritas más arriba.

20 En toda la presente descripción, se hace referencia a perfiles de índices de refracción de las fibras ópticas. Los perfiles de índices de refracción comprenden diversas secciones dispuestas de forma radial. Se hace referencia en la presente invención a formas geométricas precisas para estas secciones, como la gaussiana y la supergaussiana. Como es bien conocido para un experto en la técnica, el procedimiento de fabricación de la fibra puede introducir cambios en la forma de las secciones estructurales de los perfiles de índices de refracción descritos e idealizados, tales como formas irregulares diferentes de las formas regulares anteriormente mencionadas. Sin embargo, se ha
25 mostrado en la bibliografía que estas diferencias no cambian las características de la fibra si se mantienen bajo control.

30 En general, un perfil de índice de refracción tiene una sección asociada de perfil de índice efectivo de refracción que es diferente en forma. Una sección de perfil de índice efectivo de refracción puede sustituir a su sección asociada de perfil de índice de refracción sin alterar el rendimiento global del guíaondas. Véase, por ejemplo, "Single Mode Fiber Optics", Luc B. Jeunhomme, Marcel Dekker Inc., 1990, página 32, sección 1.3.2 o el documento US 4.406.518 (Hitachi). Se entenderá que dar a conocer y reivindicar una forma de perfil particular de índice de refracción incluye los equivalentes asociados, en la revelación y en las reivindicaciones.

Además, debe entenderse que tanto la precedente descripción general como la siguiente descripción detallada son únicamente ejemplares y explicativas, y no restrictivas de la invención según se reivindica.

35 **Breve descripción de los dibujos**

Los dibujos adjuntos, que se incorporan a esta memoria y constituyen parte de la misma, ilustran varias realizaciones de la invención y, junto con la descripción, sirven para explicar los principios de la invención.

La Fig. 1 es un diagrama esquemático que ilustra un sistema de transmisión óptica según la presente invención;

40 la Fig. 2 es un diagrama esquemático de una línea de transmisión de un sistema de transmisión óptica según la técnica anterior, que ilustra la dispersión acumulada y la atenuación de una señal en la línea de transmisión;

la Fig. 3 es una vista en corte transversal de una realización de una fibra de dispersión desplazada a la mitad según la presente invención;

45 la Fig. 4 es un gráfico que ilustra el perfil de índice de refracción de la fibra de la Fig. 3;

la Fig. 5a es un diagrama esquemático de una realización de una línea de transmisión según la presente invención que ilustra la dispersión acumulada y la atenuación de una señal en una línea de transmisión que combina tramos de fibra de NZD y fibra de dispersión desplazada a la mitad;

50 la Fig. 5b es un diagrama esquemático de una realización de una línea de transmisión según la presente invención que ilustra la dispersión acumulada y la atenuación de una señal en una línea de transmisión que combina tramos de fibra de dispersión negativa elevada y fibra de dispersión desplazada a la mitad;

la Fig. 6 es una vista de corte transversal de otra realización de una fibra de dispersión desplazada a la mitad según la presente invención;

la Fig. 7 es un gráfico que ilustra el perfil esquemático del índice de refracción de la Fig. 6;

5 la Fig. 8 es un diagrama esquemático que ilustra otra realización de un sistema de transmisión según la presente invención en la que la línea de transmisión combina tramos de fibra de dispersión desplazada a la mitad y fibra de compensación de la dispersión.

Descripción de las realizaciones preferentes

10 Ahora se hará referencia en detalle a las realizaciones de la invención actualmente preferidas, ejemplos de las cuales se ilustran en los dibujos adjuntos. Siempre que resulte posible, se usarán los mismos números de referencia en todos los dibujos para referirse a partes iguales o parecidas.

A no ser que se indique lo contrario, los parámetros de la fibra están referidos a una longitud de onda de 1550 nm.

15 Según la presente invención, se proporciona un sistema de comunicaciones ópticas de alta velocidad. El sistema de comunicaciones ópticas de alta velocidad incluye un dispositivo transmisor para añadir una señal a una línea de transmisión. Se proporciona un receptor para recibir la señal procedente del dispositivo transmisor. Un sistema de comunicaciones ópticas es ilustrado en la Fig. 1 y es designado en su conjunto por el número de referencia 10.

Según se ilustra en la Fig. 1, el sistema 10 de comunicaciones ópticas incluye un dispositivo transmisor 12, una línea 14 de transmisión y un dispositivo receptor 26. El dispositivo transmisor 12 añade una señal a la línea 14 de transmisión. Preferentemente, la longitud de onda operativa del dispositivo transmisor está en torno a 1560 nm. Sin embargo, los canales de WDM pueden tener longitudes de onda, por ejemplo, en el intervalo de 1500 - 1625 nm.

20 La presente invención contempla el uso de cualquier dispositivo o combinación de dispositivos inmediatamente evidente al experto en la técnica para añadir la señal a la línea de transmisión. El transmisor 12 podría incluir, por ejemplo, un láser DFB modulado directa o externamente, por ejemplo con un interferómetro Mach-Zehnder, o una combinación de tales dispositivos en una configuración de WDM. El transmisor 12 también podría comprender convertidores de longitud de onda para recibir longitudes de onda de señales procedentes de una red de transmisión separada y convertir las longitudes de onda portadoras en longitudes de onda características de forma convencional.

25 El sistema de comunicaciones ópticas es capaz de soportar cualquier tipo de protocolo de comunicaciones para las señales transmitidas, como NRZ (sin retorno a cero) o, de forma alternativa, RZ (con retorno a cero), por ejemplo, de tipo solitón. Además, el sistema no está limitado a una tasa de bits específica. Valores ejemplares para la tasa de bits son 2,5 Gbit/s, 10 Gbit/s, 40 Gbit/s.

30 Según la presente invención, la línea 14 de transmisión incluye al menos una fibra óptica. Sin embargo, la presente invención también contempla el uso de múltiples fibras en la misma línea de transmisión para aumentar la capacidad de transporte de señales de la línea. Las múltiples fibras pueden estar unidas entre sí en un cable.

35 Según la presente invención, el sistema 10 puede incluir diversos amplificadores ópticos 24 colocados entre los tramos de fibra de la línea 14 de transmisión. Los amplificadores 24 pueden comprender amplificadores de fibra dopados con erbio para amplificar las señales dentro de la ventana de transmisión de 1550 nm (denominada también banda C). El amplificador también puede comprender amplificadores de fibra dopados con erbio para amplificar las señales dentro de la ventana de transmisión de 1585 nm (denominada también banda L). El sistema 10 también puede incluir un multiplexor óptico de adición/eliminación (OADM, no mostrado) para eliminar señales del sistema 10 o añadirselas, particularmente en una configuración de WDM. El OADM y los amplificadores 24 pueden ser de cualquier tipo comúnmente conocido en la técnica. Por último, el sistema 10 puede incluir un receptor 26 conectado directamente a la fibra óptica 22 o acoplado a la fibra óptica por medio de otros componentes intermedios. El receptor 26, como se conoce de forma generalizada en la técnica, puede incluir un dispositivo de encaminamiento, un desmultiplexor y similares para contribuir a descifrar la información transportada en las señales ópticas.

45 Con el término "acoplado" se quiere decir que dos dispositivos físicos están unidos por medio de una vía óptica común y, posiblemente, aunque no necesariamente, adheridos físicamente. Los solicitantes usan los términos "acoplado" y "conectado" de forma intercambiable para describir la invención, y los expertos en la técnica apreciarán que no es preciso que los diversos componentes identificados en el presente documento estén físicamente unidos entre sí para proporcionar el acoplamiento óptico que contribuya a lograr los resultados beneficiosos de la invención.

50 Según se muestra en la Fig. 1, la línea 14 de transmisión incluye un primer tramo 16 y un segundo tramo 18. En la realización ejemplar, la línea de transmisión 14 también puede incluir tramos adicionales 20 y 22. Cada tramo incluye al menos una fibra monomodo. La presente invención también contempla el uso de múltiples fibras dentro de cada tramo para aumentar la capacidad de transporte de señales de la línea de transmisión.

Como es bien sabido en la técnica, la fibra dentro de cada tramo 16, 18, 20 y 22 tiene una cierta atenuación y cierta dispersión a la frecuencia operativa. La atenuación y la dispersión acumuladas de la señal por la línea de transmisión se acumulan a medida que la señal viaja por cada tramo. Pueden colocarse amplificadores 24 entre los tramos 16, 18, 20 y 22 para aumentar la potencia de las señales para responder a la atenuación de la señal.

5 La dispersión de la señal puede ser corregida conectando fibras que tienen dispersiones de signo opuesto. Por ejemplo, el primer tramo 16 puede tener una dispersión negativa y el segundo tramo 18 puede tener una dispersión positiva. La dispersión negativa de la primera fibra hará que la dispersión acumulada se vuelva más negativa a lo largo de la longitud de la fibra 16. La dispersión positiva del segundo tramo 18 compensa la dispersión negativa del primer tramo, llevando la dispersión acumulada por la línea 14 de transmisión hasta aproximadamente cero, es decir, hasta un valor que sea lo suficientemente bajo, dependiendo de características del sistema como formato de la señal, tasa de bits e intervalo de la longitud de onda, para aliviar sustancialmente los problemas ligados a la dispersión cromática. Así, los tramos primero y segundo son seleccionados con valores de dispersión y longitudes para que la dispersión acumulada alcance aproximadamente cero en el punto terminal del receptor 26.

15 Hay muchos sistemas conocidos de transmisión óptica a larga distancia. En la Fig. 2 se ilustra un ejemplo de una línea de transmisión convencional que tiene fibras con dispersiones de signo opuesto. Tal como se ilustra en la Fig. 2, la línea 30 de transmisión convencional incluye una serie de tramos 32 de fibra de dispersión negativa seguidos por un tramo 34 de fibra de dispersión positiva. La atenuación acumulada de la línea 30 de transmisión está indicada por la línea 42. El tramo 34 de fibra monomodo tiene una atenuación de menor valor que la de los tramos 32, tal como se muestra en la línea 42 para la atenuación total de la línea de transmisión. La línea delgada indica, con fines comparativos, la atenuación que tendría la línea si el tramo 34 fuera de la misma fibra de dispersión negativa usada para los tramos 32. La longitud total de los tramos de la fibra 32 de dispersión negativa está indicada por la línea 36, y la longitud de la fibra 34 de dispersión positiva está indicada por la línea 38. La dispersión acumulada de la línea de transmisión a 1560 nm está indicada por la línea 40.

25 En esta realización de ejemplo de una línea de transmisión convencional, el tramo 32 de fibra de dispersión negativa está compuesto de fibra convencional de dispersión no nula (NZD). La fibra de NZD tiene una dispersión negativa de aproximadamente -2 ps/nm/km a 1560 nm y una atenuación de aproximadamente 0,210 dB/km. Según se muestra en la Fig. 2, estos valores hacen que la dispersión acumulada de la línea 40 disminuya gradualmente en valor absoluto y que la atenuación acumulada de la línea 42 aumente gradualmente a lo largo de los tramos 32 de fibra de la longitud 36. En cambio, el tramo 34 de dispersión positiva está compuesto de forma convencional de fibra monomodo (SMF) que tiene una dispersión de aproximadamente +18 ps/nm/km a 1560 nm y una atenuación de aproximadamente 0,190 dB/km. Tal como se muestra en la Fig. 2, estos valores para la fibra SMF hacen que la dispersión acumulada de la línea 40 se acerque al nivel cero y que la atenuación acumulada de la línea 42 aumente a una tasa inferior que una fibra de NZD correspondiente a lo largo del tramo 34 de fibra de longitud 38. Las longitudes del tramo 36 de dispersión negativa y del tramo 38 de dispersión positiva están dimensionadas de tal modo que la dispersión total 40 de la línea de transmisión se aproxime aproximadamente a cero al final de la línea de transmisión.

40 De manera alternativa, las líneas de transmisión mostradas en la Fig. 2 pueden usar una fibra de alma de sílice pura (PSC) para componer el tramo 34 de dispersión positiva. Esta fibra tiene una dispersión de aproximadamente +19 ps/nm/km a 1560 nm y una atenuación de aproximadamente 0,180 dB/km. En comparación con la fibra SMF usada típicamente, la fibra de PSC tiene una atenuación menor y una dispersión ligeramente mayor. Tal como se muestra en los ejemplos que siguen, el uso de esta fibra dará como resultado una atenuación menor en todo el sistema que el de la fibra SMF.

45 Según la presente invención, la línea de transmisión incluye un primer tramo que tiene al menos una fibra monomodo que tiene un valor de dispersión negativo a la longitud de onda operativa conectado a un segundo tramo que tiene al menos una fibra monomodo que tiene un valor de dispersión positivo a la longitud de onda operativa.

La fibra de dispersión negativa es una fibra que tiene una dispersión negativa elevada en el intervalo de -10 a -2 ps/nm/km, preferentemente en el intervalo de -8 a -4 ps/nm/km. La fibra de dispersión negativa puede tener una pendiente de dispersión negativa. Preferentemente, la fibra de dispersión negativa es cableada.

50 La fibra de dispersión positiva es una fibra de dispersión desplazada a la mitad (HDSF). La fibra de dispersión desplazada a la mitad tiene una longitud de onda de dispersión cero mayor que 1450 nm y menor que 1500 nm, una diferencia pico del índice de refracción menor o igual a aproximadamente 0,0140 y un área efectiva de al menos 60 μm^2 . La fibra cableada tiene una longitud de onda límite menor de aproximadamente 1500 nm. Ventajosamente, la fibra de dispersión desplazada a la mitad tiene una atenuación igual o menor que aproximadamente 0,210 dB/km a una longitud de onda de 1560 nm.

55 Preferentemente, la fibra de dispersión desplazada a la mitad tiene una atenuación igual o menor que aproximadamente 0,205 dB/km, aún más preferentemente igual o menor que aproximadamente 0,200 dB/km a una longitud de onda de 1560 nm. Ventajosamente, la diferencia pico del índice de refracción es menor o igual a aproximadamente 0,0130. Preferentemente, el área efectiva es de al menos 65 μm^2 , y aún más preferentemente de al menos 70 μm^2 . El alma de la fibra de dispersión desplazada a la mitad está libre de capas de diferencia negativa

del índice de refracción. La dispersión a la longitud de onda operativa preferente de 1560 nm está entre aproximadamente 6 ps/nm/km y 11 ps/nm/km, preferentemente entre aproximadamente 7 ps/nm/km y 10 ps/nm/km. Así, la fibra de dispersión desplazada a la mitad tiene una dispersión menor que la fibra SMF usada convencionalmente y que la fibra de PSC. Para dar cuenta de la menor dispersión, se precisará un tramo mayor de fibra de dispersión desplazada a la mitad para compensar la dispersión negativa. La presente invención contempla que la proporción entre fibra de dispersión negativa y fibra de dispersión desplazada a la mitad no sea mayor de aproximadamente 6:1, preferentemente no mayor de aproximadamente 4:1. Según se muestra en los ejemplos presentados más abajo, el uso de fibra de dispersión desplazada a la mitad dará como resultado una reducción en la atenuación total del sistema, así como una reducción de los efectos no lineales totales. Otra ventaja de la fibra de dispersión desplazada a la mitad es la atenuación relativamente baja, en conexión con un contenido bajo en dopantes logrado por los valores relativamente bajos para la diferencia pico del índice de refracción. No teniendo áreas rebajadas por dopado en el alma, es decir, sin capas con diferencia negativa del índice de refracción, la fibra de dispersión desplazada a la mitad consigue la ventaja adicional de una atenuación reducida resultante del contenido dopante relativamente bajo. Además, la evitación de dopantes de rebaje, como el flúor, simplifica significativamente el proceso de producción.

La presente invención contempla que la fibra de dispersión desplazada a la mitad puede tener cualquier perfil de índice de refracción que resulte fácilmente evidente para un experto en la técnica que es capaz de lograr las características de transmisión descritas en el presente documento. El índice de refracción puede tener, por ejemplo, una forma de pico sobre un pedestal, una forma de pico y anillo o una forma de doble pico. En la solicitud de patente EP0965866, transferida al mismo cesionario de la presente solicitud, se dan a conocer fibras de perfil de doble pico.

En la Fig. 4 se ilustra un perfil de pico sobre pedestal para una fibra 18 de dispersión desplazada a la mitad. La fibra 18 tiene una sección transversal según se ilustra en la Fig. 3, e incluye un alma interior 70, una primera capa 72 de vidrio y un revestimiento 76, teniendo cada uno una cierta diferencia del índice de refracción. Las diversas capas que comprenden la fibra óptica de la Fig. 4 pueden contener cada una dopantes que modifican el índice de refracción, como GeO₂ u otros dopantes bien conocidos, para variar el perfil del índice de refracción. La elección de los dopantes y las concentraciones para lograr los perfiles dados a conocer están dentro del dominio de una persona con un conocimiento normal de la técnica.

Como es sabido por las personas con un dominio normal de la técnica, la diferencia del índice de refracción se refiere a la diferencia refractiva entre una capa dada de vidrio y el índice de refracción de la sílice pura (SiO₂). Es decir, la diferencia del índice de refracción Δn_1 del alma interior 70 es igual a $(n_1 - n_{\text{sílice}})$. Además, siguiendo la notación estándar en el campo de las fibras ópticas, se entiende en la totalidad de la presente descripción y de las reivindicaciones que las diferencias del índice de refracción se refieren al revestimiento ($\Delta n = n - n_{\text{revestimiento}}$) siempre que el revestimiento incluya dopantes que hagan que el índice de refracción del revestimiento óptico en la fibra estirada difiera del índice de refracción de la sílice pura.

Según se muestra en la Fig. 4, el perfil 80 de índice de refracción de pico sobre pedestal se caracteriza por un pico 82 y un área exterior (pedestal) 84. Un revestimiento 86 con un índice de refracción sustancialmente constante rodea el área exterior 84. El perfil de índice de refracción de pico sobre pedestal puede ser modelado como una superposición de dos regiones de perfiles supergaussianos, uno modelando la región del alma interior y teniendo un exponente igual a aproximadamente 2 y el segundo modelando la base y teniendo un exponente igual a aproximadamente 10.

Los radios r_1 , r_2 de las dos regiones del perfil se definen como la "sigma" del perfil supergaussiano que modela la región, según la siguiente fórmula para la diferencia del índice de refracción como función del radio:

$$\Delta n(r) = (\Delta n_1 - \Delta n_2) \exp\left[-0,5 * \left(\frac{r}{r_1}\right)^2\right] + \Delta n_2 \exp\left[-0,5 * \left(\frac{r}{r_2}\right)^{10}\right]$$

Tal como se muestra en la Fig. 4, la primera capa 72 de vidrio forma el pico 82 y se extiende desde el eje de la fibra hasta un radio exterior de r_1 de aproximadamente 1,0 μm y tiene una diferencia pico Δn_1 del índice de refracción en el intervalo de aproximadamente 0,0100 a 0.0140. En el presente ejemplo, la primera capa 72 de vidrio tiene una diferencia pico Δn_1 del índice de refracción de aproximadamente 0,0135.

La segunda capa 74 de vidrio forma un área exterior 84 y se extiende hasta un radio exterior r_2 de aproximadamente 7,5 μm y tiene una diferencia pico Δn_2 del índice de refracción en el intervalo de aproximadamente 0,0005 a 0,0030. En el presente ejemplo, la segunda capa 74 de vidrio tiene una diferencia pico Δn_2 del índice de refracción de aproximadamente 0,0020.

El perfil 80 del índice de refracción de este ejemplo produce una fibra que tiene las siguientes características de transmisión: una longitud de onda límite para la fibra cableada de aproximadamente 1300 nm, una dispersión de 8,9 ps/nm/km a la longitud de onda de 1560 nm, una pendiente de dispersión de 0,087 ps/nm²/km, una longitud de onda

de dispersión cero de 1458 nm, un diámetro del campo de modo de 10,1 μm , un área efectiva de 77 μm^2 , un coeficiente de falta de linealidad de 1,15 $\text{W}^{-1} \text{km}^{-1}$, un coeficiente de macrocurvatura de 0,01 dB/km y un coeficiente de microcurvatura de 7 (dB/km)/(g/mm).

5 En el marco del presente trabajo, el coeficiente de macrocurvatura se refiere a una medición de pérdida a 1550 nm para la fibra doblada en un mandril de 60 mm de diámetro, mientras que el coeficiente de microcurvatura se refiere a una medición a 1550 nm según el procedimiento de la bobina expansible, descrito, por ejemplo, en G. Grasso y F. Meli, "Microbending losses of cabled single-mode fibers", ECOC'88, pp. 526-ss., o en G. Grasso et al., "Microbending effects in single-mode optical cables", International Wire and Cable Symposium, 1988, pp. 722-ss.

10 La Fig. 5a representa una primera realización de la línea de transmisión óptica según la presente invención. En esta realización, los tramos 16 de dispersión negativa son de fibra de NZD que tiene una dispersión de aproximadamente -2 ps/nm/km y una atenuación de aproximadamente 0,210 dB/km a 1560 nm. Los tramos 18 de dispersión positiva son fibras de HDSF que tiene una dispersión de aproximadamente +8 ps/nm/km y una atenuación de aproximadamente 0,195 a 1560 nm. Las longitudes de los tramos 16 de dispersión negativa son indicadas por las líneas 52 y las longitudes de los tramos 18 de dispersión positiva son indicadas por las líneas 54. La dispersión acumulada de la línea de transmisión a 1560 nm es indicada por la línea 56, y la atenuación acumulada de la línea de transmisión es indicada por la línea 50.

15 La Fig. 5b representa una segunda realización de la línea de transmisión óptica según la presente invención. En esta realización, los tramos 16 de dispersión negativa son de fibra de dispersión negativa muy elevada (HNDF), del tipo dado a conocer en la solicitud de patente nº WO1999EP996, transferida al mismo cesionario de la presente solicitud, que tiene una dispersión de aproximadamente -4,5 ps/nm/km y una atenuación de aproximadamente 0,210 dB/km a 1560 nm. Los tramos 18 de dispersión positiva son de fibra de dispersión desplazada a la mitad que tiene una dispersión de aproximadamente +8 ps/nm/km y una atenuación de aproximadamente 0,195 a 1560 nm. Las longitudes de los tramos 16 de dispersión negativa son indicadas por las líneas 52 y las longitudes de los tramos 18 de dispersión positiva son indicadas por las líneas 54. La dispersión acumulada de la línea de transmisión a 1560 nm es indicada por la línea 56, y la atenuación acumulada de la línea de transmisión es indicada por la línea 50.

20 Comparando las Figuras 5a y 5b con la Fig. 2, resulta evidente que la presente invención proporciona una disposición que incluye el uso de varios tramos de fibra 18 de dispersión positivo, que disminuye la atenuación global y los efectos no lineales con respecto a las disposiciones convencionales. La longitud 52 del tramo negativo y la longitud 54 del tramo positivo se escogen de tal modo que la dispersión positiva compense el tramo de dispersión negativa para llevar la dispersión total 56 hasta aproximadamente cero, es decir, hasta un valor que sea lo suficientemente bajo, dependiendo de características del sistema tales como formato de la señal, tasa de bits e intervalo de la longitud de onda, para aliviar sustancialmente los problemas ligados a la dispersión cromática. Preferentemente, la proporción entre la longitud del tramo de dispersión negativa y la longitud del tramo de dispersión positiva será menor de aproximadamente 6:1, más preferentemente menor de 4:1.

25 Al ser la dispersión del tramo positivo de la presente invención menor que la dispersión del tramo correspondiente de la línea convencional, la longitud del tramo positivo de la presente invención es mayor que en la línea convencional correspondiente para compensar la disminución en la dispersión. Los solicitantes han identificado que la atenuación de la fibra usada para el tramo positivo es, en general, menor que la atenuación de la fibra usada para el tramo negativo de la línea. La longitud del tramo negativo disminuye según la presente invención. En consecuencia, se reduce la atenuación total de la línea.

30 Además, al transmitir la señal a una longitud de onda en la que la dispersión tiene un valor absoluto que es significativamente mayor que cero a lo largo de toda la línea, se evita el problema de la FWM y la XPM incluso con una separación densa de canales y una potencia elevada de la señal, tal como se ha expuesto con anterioridad. Así, la línea de transmisión de la presente invención está bien dotada para su uso con la tecnología de WDM denso e hiperdenso, en la que la separación de canales es menor o igual a 100 GHz, o aproximadamente 0,8 nm.

35 Además, la línea de transmisión de la presente invención es menos susceptible a todos los efectos no lineales, incluyendo la automodulación de fase (SPM), la dispersión estimulada de Brillouin (SBS) y la dispersión estimulada de Raman (SRS). Esto está ligado al hecho de que, en la presente invención, la longitud de la porción del tramo de dispersión positiva, que tiene un área efectiva mayor que la porción del tramo de dispersión negativa, es mayor que la longitud de la porción del tramo de dispersión positiva de los sistemas convencionales.

40 Las siguientes tablas ilustran la ganancia de atenuación de las diversas realizaciones del sistema de transmisión de la presente invención en comparación con los sistemas de transmisión convencionales. Cada ejemplo se basa en una línea de transmisión que tiene una longitud de 800 km.

45 La Tabla 1 identifica las especificaciones de fibra de dos configuraciones de sistema que incluyen un sistema convencional y un sistema que usa fibra de NZD y PSC en comparación con dos realizaciones ejemplares de la presente invención, es decir, la fibra de dispersión desplazada a la mitad (HDSF) usada ya sea con una fibra monomodo convencional de dispersión no nula (NZD) o con una fibra de dispersión negativa muy elevada (HNDF).

Tabla 1

Tipo de sistema	Tipo de fibra de disp. neg. / valor de disp. (ps/nm/km) a 1560 nm	Longitud (km) / atenuación (dB/km) a 1560 nm	Tipo de fibra de disp. pos. / valor de disp. (ps/nm/km) a 1560 nm	Longitud (km) / atenuación (dB/km) a 1560 nm
Config. nº 1	NZD / -2	720/0,210	SMF / +18	80/0,190
Config. nº 2	NZD / -2	725/0,210	PSC / +19	75/0,180
Realiz. nº 1	NZD / -2	640/0,210	HDSF / +8	160/0,195
Realiz. nº 2	HNDF / -4,5	510/0,210	HDSF / +8	290/0,195

La Tabla 2 resume la atenuación total del sistema para cada sistema de la Tabla 1 y muestra la mejora (disminución) en la atenuación en comparación con el sistema convencional.

Tabla 2

Tipo de sistema	Atenuación total del sistema (dB) a 1560 nm	Disminución de la atenuación (dB) a 1560 nm
Configuración nº 1	166,4	-
Configuración nº 2	165,7	0,7
Realización nº 1	165,5	0,8
Realización nº 2	163,6	2,8

5 Tal como se muestra en las Tablas 1 y 2, la selección y la disposición de fibras ópticas para las realizaciones de la presente invención llevan a una atenuación mejorada y a menores efectos no lineales que en un sistema convencional. En particular, según se muestra en la Tabla 2, las realizaciones de la invención que usan fibra de NZD y HNDF para los tramos de dispersión negativa disminuyen la atenuación del sistema en 0,8 dB y 2,8 dB, respectivamente.

10 Según se muestra en la Fig. 7, en otra realización preferente de una fibra de dispersión desplazada a la mitad, el perfil 120 del índice de refracción puede tener una forma de pico y anillo. Tal como se muestra en la Fig. 6, la fibra 68 incluye un alma interior 60, una primera capa 62 de vidrio, una segunda capa 64 de vidrio y un revestimiento 66. Tal como se muestra en la Fig. 7, el perfil 120 de pico y anillo se caracteriza por un primer pico 122 y un segundo pico 126, separados por un área 124 de índice de refracción sustancialmente constante. Un revestimiento 128 con índice de refracción sustancialmente constante rodea el segundo pico 126.

15 La fibra 68 de dispersión desplazada a la mitad en la Fig. 7, que tiene un perfil 120 del índice de refracción, tiene las siguientes características de transmisión: una longitud de onda límite para la fibra cableada de menos de 1500 nm (preferentemente de menos de 1450 nm), una dispersión entre aproximadamente 6,0 ps/nm/km y 11,0 ps/nm/km (preferentemente entre aproximadamente 7,0 ps/nm/km y 10,0 ps/nm/km) a 1560 nm, un área efectiva de más de 60 μm^2 (preferentemente, mayor de 70 μm^2) a 1550 nm, un coeficiente de macrocurvatura menor o igual a 0,01 dB/km y un coeficiente de microcurvatura menor o igual a 10 (dB/km)/(g/mm) (preferentemente menor o igual a 6 (dB/km)/(g/mm)).

El perfil del índice de refracción de pico y anillo puede ser modelado como la suma de dos curvas gaussianas, modelando una la región del alma interior y la segunda el anillo exterior.

25 Además, el modelo tiene en cuenta la depresión a lo largo del eje central de la fibra que puede ocurrir durante la fabricación, en particular con los procedimientos de OVD y MCVD. El modelo usado para la depresión es un cono invertido seguido por una región de índice de refracción constante. La depresión tiene el efecto de reducir la diferencia real del índice de refracción a lo largo del eje de la fibra con respecto al valor nominal Δn_1 . Así, la diferencia máxima del índice de refracción (Δn_{max}) se logra cerca del eje de la fibra y es, por ejemplo, aproximadamente el 80% del valor Δn_1 .

Los parámetros r_1 , r_2 y w de las regiones del perfil se definen según la curva gaussiana que modela la región, según la siguiente fórmula para la diferencia del índice de refracción como función del radio:

$$\Delta n(r) = \Delta n_1 \exp\left[-0,5 * \left(\frac{r}{r_1}\right)^2\right] + \Delta n_3 \exp\left[-0,5 * \left(\frac{r-r_2}{w}\right)^2\right]$$

35 Tal como se muestra en la Fig. 7, el alma interior 60 tiene un radio r_1 . Un intervalo preferente para r_1 está entre aproximadamente 1,0 y 1,8 micrómetros. Entre el eje central de la fibra y su radio exterior, el alma interior 60 incluye un dopante que aumenta el índice de refracción, tal como GeO_2 o similar, que produce un índice pico de refracción en el centro axial de la fibra 68, o cercano al mismo, y un mínimo para el alma interior en su radio exterior. La diferencia pico del índice de refracción en el alma interior 60 es Δn_{max} . Un intervalo preferente para Δn_{max} está entre aproximadamente 0,0090 y 0,00130. La concentración del dopante de aumento del índice de refracción disminuye desde el centro del alma interior 60 hasta su radio exterior para producir un perfil que tiene una forma graduada.

40 Si está presente, la depresión puede tener un radio entre aproximadamente 0,2 y 1 micrómetros, por ejemplo de aproximadamente 0,35 micrómetros.

La primera capa 62 de vidrio rodea el alma interior 60 y está caracterizada por un índice de refracción a todo su ancho que es menor que el índice de refracción del alma interior 60. La primera capa 62 de vidrio se extiende desde el radio exterior del alma interior 60 hasta el radio interior de la segunda capa 64 de vidrio. Preferentemente, la primera capa 62 de vidrio está fabricada de vidrio con una diferencia del índice de refracción de aproximadamente 0. En la práctica, la primera capa 62 de vidrio puede tener una diferencia real del índice de refracción mayor que cero, produciéndose colas de difusión en la proximidad de los picos durante la producción de la fibra. En particular, cuando la segunda capa 64 de vidrio está lo bastante cerca del eje o es lo bastante ancha, su cola interior puede solaparse con la cola exterior del alma interior 60.

La segunda capa 64 de vidrio rodea la primera capa 62 de vidrio. La segunda capa 64 de vidrio se extiende sobre una anchura w y tiene un radio r_2 de la línea central. Un intervalo preferente para w está entre aproximadamente 0,6 y 1,1 micrómetros. Un intervalo preferente para r_2 está entre aproximadamente 5 y 7 micrómetros. Tal como se muestra en la Fig. 7, la segunda capa de vidrio tiene un índice de refracción máximo Δn_3 dentro de su anchura. Un intervalo preferente para Δn_3 está entre aproximadamente 0,0020 y 0,0080. A la segunda capa 64 de vidrio, como el alma interior 60, se le aumenta su diferencia del índice de refracción dopando la anchura de la capa de vidrio con GeO_2 u otros dopantes bien conocidos que aumentan el índice de refracción.

Por último, un revestimiento fotoconductor 66 rodea la segunda capa 64 de vidrio de manera convencional para contribuir a guiar la luz que se propaga a lo largo del eje de la fibra 68. Preferentemente, el revestimiento 66 tiene una diferencia del índice de refracción sustancialmente igual a cero, pero puede incluir dopantes que no eleven su índice de refracción por encima del de los índices máximos de refracción 122 y 126 del alma interior y de la segunda capa.

La Tabla 3 muestra los parámetros de cinco ejemplos diferentes de la realización de pico y anillo de la presente invención.

Tabla 3

	Ejemplo 1	Ejemplo 2	Ejemplo 3	Ejemplo 4	Ejemplo 5
Δn_{\max}	0,0101	0,0115	0,0098	0,0113	0,0128
Δn_3	0,0046	0,0037	0,0031	0,0040	0,0040
r_1 (μm)	1,6	1,3	1,6	1,3	1,09
r_2 (μm)	6,6	5,8	6,1	5,6	5,2
w (μm)	0,6	0,9	0,9	0,9	1,0

En la Tabla 4 se dan las características de transmisión de las fibras ejemplares de la Tabla 3.

Tabla 4

	Ejemplo 1	Ejemplo 2	Ejemplo 3	Ejemplo 4	Ejemplo 5
Dispersión (a 1560nm) (ps/nm/km)	6,3	6,2	8,7	8,6	8,8
Pendiente (a 1560 nm) (ps/nm /km)	0,086	0,097	0,084	0,094	0,098
Longitud de onda (nm) de dispersión cero	1489	1495	1460	1472	1476
MFD (a 1550 nm)	9,7	9,9	10,1	10,3	10,4
Área efectiva (a 1550 nm)	71,5	76,5	76,1	82,8	86,4
Coefficiente de no linealidad ($\text{W}^{-1} \text{km}^{-1}$)	1,24	1,16	1,16	1,07	1,02
Límite del cable (nm)	1300	1300	1300	1300	1310
Macrocurvatura (dB/km)	0,01	0,01	0,005	0,01	0,005
Microcurvatura (dB/km)/(g/mm)	6	8	7	9	10

Tal como se muestra en la Tabla 3 y en la Tabla 4, son posibles diferentes elecciones de dispersión, de pendiente de dispersión y de área efectiva, entre otras, para la realización de pico y anillo. Las diferentes elecciones representan diferentes soluciones de compromiso entre atenuación, área efectiva, dispersión y pendiente de dispersión.

Según la presente invención, en la Fig. 8 se ilustra otra realización de un sistema de comunicaciones ópticas de alta velocidad y se lo designa en conjunto con el número de referencia 90.

Según se ilustra en la Fig. 8, el sistema 90 de comunicaciones ópticas incluye un dispositivo transmisor 12, una línea 94 de transmisión y un dispositivo receptor 26. El dispositivo transmisor 12 añade una señal a la línea 14 de transmisión. Preferentemente, una longitud de onda operativa del dispositivo transmisor está en torno de los 1560 nm. Sin embargo, los canales de WDM pueden tener longitudes de onda, por ejemplo, en el intervalo de 1500 - 1625 nm.

La presente invención contempla el uso de cualquier dispositivo o combinación de dispositivos inmediatamente evidente para un experto en la técnica para añadir la señal a la línea de transmisión. El transmisor 12 podría incluir, por ejemplo, un láser DFB modulado directa o externamente, por ejemplo con un interferómetro Mach-Zehnder, o una combinación de tales dispositivos en una configuración de WDM. El transmisor 12 también podría comprender

convertidores de longitud de onda para recibir longitudes de onda de señales procedentes de una red de transmisión separada y convertir las longitudes de onda portadoras en longitudes de onda características de forma convencional.

5 El sistema de comunicaciones ópticas es capaz de soportar cualquier tipo de protocolo de comunicaciones para las señales transmitidas, como NRZ (sin retorno a cero) o, de forma alternativa, RZ (con retorno a cero), por ejemplo, de tipo solitón. Además, el sistema no está limitado a una tasa de bits específica.

Según la presente invención, la línea 94 de transmisión incluye al menos una fibra óptica. Sin embargo, la presente invención también contempla el uso de múltiples fibras en la misma línea de transmisión para aumentar la capacidad de transporte de señales de la línea. Las múltiples fibras pueden estar unidas entre sí en un cable.

10 Según la presente invención, el sistema 90 puede incluir diversos amplificadores ópticos 24 colocados entre los tramos de fibra de la línea 94 de transmisión. Los amplificadores 24 pueden comprender amplificadores de fibra dopados con erbio para amplificar las señales dentro de la ventana de transmisión de 1550 nm (denominada también banda C), así como dentro de la ventana de transmisión de 1585 nm (denominada también banda L). El sistema 90 también puede incluir un multiplexor óptico de adición/eliminación (OADM, no mostrado) para eliminar señales del sistema 90 o añadirselas, particularmente en una configuración de WDM. El OADM y los amplificadores 15 24 pueden ser de cualquier tipo comúnmente conocido en la técnica. Por último, el sistema 90 puede incluir un receptor 26 conectado directamente a la línea óptica 94 o acoplado a la línea óptica 94 por medio de otros componentes intermedios. El receptor 26, como se conoce de forma generalizada en la técnica, puede incluir un dispositivo de encaminamiento, un desmultiplexor y similares para contribuir a descifrar la información transportada en las señales ópticas.

20 Tal como se muestra en la Fig. 8, la línea 94 de transmisión incluye un primer tramo 18 y un segundo tramo 96. En la realización ejemplar, la línea 14 de transmisión también puede incluir tramos adicionales. Cada tramo incluye al menos una fibra monomodo. La presente invención también contempla el uso de múltiples fibras dentro de cada tramo para aumentar la capacidad de transporte de señales de la línea de transmisión.

25 El primer tramo 18 incluye una fibra de dispersión desplazada a la mitad según una de las realizaciones descritas en el presente documento. Aunque una fibra de NZD de dispersión positiva usada de forma convencional tiene una dispersión típica de aproximadamente 5 ps/nm/km a 1560 nm, la fibra de HDSF tiene una dispersión más elevada que las fibras de NZD de dispersión positiva usadas convencionalmente, lo que da como resultado una degradación de FWM reducida. Además, la fibra de HDSF tiene un valor relativamente elevado de pendiente de dispersión, lo que permite lograr un valor relativamente grande de área efectiva que es ventajoso para reducir todos los efectos no 30 lineales.

Además, la atenuación de la fibra de HDSF es, preferentemente, menor o igual a 0,205 dB/km, lo que da como resultado una atenuación reducida para la línea de transmisión.

35 El segundo tramo 96 comprende una fibra de dispersión negativa. La dispersión negativa del segundo tramo 96 compensa la dispersión positiva del primer tramo para llevar la dispersión acumulada en la línea 94 de transmisión hasta aproximadamente cero, es decir, hasta un valor que sea lo suficientemente bajo, dependiendo de características del sistema tales como formato de la señal, tasa de bits e intervalo de la longitud de onda, para aliviar sustancialmente los problemas ligados a la dispersión cromática. Así, se seleccionan los tramos primero y segundo con valores de dispersión y longitudes de modo que la dispersión acumulada alcance aproximadamente cero en el punto terminal del receptor 26.

40 En el sistema de comunicaciones ópticas de la presente invención, el segundo tramo 96 es una fibra compensadora de la dispersión (DCF). Hay muchas fibras conocidas de compensación de la dispersión. La dispersión cromática de las fibras DCF oscila entre aproximadamente -300 ps/nm/km y aproximadamente -50 ps/nm/km. Un valor típico es de aproximadamente -100 ps/nm/km. Preferentemente, la pendiente de la dispersión cromática de la fibra es negativa para compensar la pendiente de la dispersión cromática positiva de la HDSF 18. Preferentemente, la DCF 45 está empaquetada en un módulo compacto o, alternativamente, puede ser cableada de forma similar a las fibras de transmisión.

Además, puede incorporarse un módulo compacto que incluya la fibra DCF en el amplificador 24. En particular, cuando el amplificador tiene una arquitectura de doble etapa, la fibra DCF está acoplada ventajosamente entre las etapas del amplificador.

50 Además, las fibras DCF puede estar dedicadas a una banda de longitud de onda particular. Por ejemplo, en el caso de una transmisión simultánea por las bandas C y L, las dos bandas pueden ser desmultiplexadas y enviadas a dos DCF diferentes en configuración paralela. Esto tiene la ventaja de relajar los requisitos de la pendiente de dispersión para la HDSF.

55 Según otra realización, el segundo tramo 96 es una fibra que tiene una dispersión negativa muy elevada en el intervalo de -50 a -10 ps/nm/km, por ejemplo de aproximadamente -18 ps/nm/km, ya sea cableada o en

configuración de módulo compacto. Ventajosamente, la fibra de dispersión negativa muy elevada tiene una pendiente de dispersión negativa.

- 5 Otras realizaciones de la invención resultarán evidentes para los expertos en la técnica a partir de la consideración de la memoria y la puesta en práctica de la invención dada a conocer en el presente documento. Se pretende que la memoria y los ejemplos sean considerados únicamente como ejemplares, estando indicado el verdadero alcance de la invención por las reivindicaciones siguientes.

REIVINDICACIONES

1. Una fibra monomodo de transmisión óptica (18; 78; 68), teniendo la fibra un alma y un revestimiento (76; 66), comprendiendo el alma:
 - un alma interior (70; 60) que tiene una primera diferencia del índice de refracción; y
 - 5 – una primera capa (72; 62) de vidrio que rodea el alma interior y que tiene una segunda diferencia del índice de refracción,
 en la que:
 - (a) la primera diferencia del índice de refracción y la segunda diferencia del índice de refracción son mayores que cero, siendo la segunda diferencia del índice de refracción menor que la primera diferencia del índice de refracción, o
 - 10 (b) el alma comprende una segunda capa (64) de vidrio que rodea a la primera capa de vidrio y que tiene una tercera diferencia del índice de refracción, siendo la primera diferencia del índice de refracción mayor que cero, siendo la segunda diferencia del índice de refracción aproximadamente cero y siendo la tercera diferencia del índice de refracción mayor que cero y
 la fibra tiene una diferencia del índice de refracción pico menor o igual a aproximadamente 0,0140, una longitud de onda de dispersión cero mayor que 1450 nm y menor que 1500 nm, un valor de dispersión entre aproximadamente 6 y 11 ps/nm/km a una longitud de onda operativa de aproximadamente 1560 nm y un área efectiva de al menos 60 μm^2 y menor que 87 μm^2 , y en la que la fibra tiene una longitud de onda límite del cable de menos de aproximadamente 1500 nm.
- 20 2. La fibra (18; 78; 68) de la reivindicación 1 en la que, en el caso a), la primera diferencia del índice de refracción está en el intervalo de aproximadamente 0,0100 a 0,0140 y la segunda diferencia del índice de refracción está en el intervalo de aproximadamente 0,0005 a 0,0030.
- 25 3. La fibra (18; 78; 68) de la reivindicación 1 en la que, en el caso b), la primera diferencia del índice de refracción está entre aproximadamente 0,0090 y 0,0130 y la tercera diferencia del índice de refracción está entre aproximadamente 0,0020 y 0,0080.
4. La fibra (18; 78; 68) de la reivindicación 1 en la que la fibra tiene una pendiente de dispersión igual o mayor que aproximadamente 0,06 ps/nm²/km.
5. La fibra (18; 78; 68) de la reivindicación 1 en la que la fibra tiene una pendiente de dispersión igual o mayor que aproximadamente 0,07 ps/nm²/km.
- 30 6. La fibra (18; 78; 68) de la reivindicación 1 en la que el área efectiva es mayor de 65 μm^2 .
7. La fibra (18; 78; 68) de la reivindicación 1 en la que la fibra tiene una atenuación inferior a aproximadamente 0,210 dB/km a una longitud de onda de 1560 nm.
8. La fibra (18; 78; 68) de la reivindicación 1 en la que la fibra tiene un valor de dispersión entre aproximadamente 7 y 10 ps/nm/km a una longitud de onda operativa de aproximadamente 1560.
- 35 9. Una línea de transmisión óptica que comprende:
 - un primer tramo que incluye al menos una fibra monomodo (16) que tiene una dispersión negativa a una longitud de onda operativa; y
 - un segundo tramo acoplado al primer tramo, teniendo el segundo tramo al menos una fibra monomodo (18) que tiene una dispersión positiva a la longitud de onda operativa, compensando la dispersión positiva del
 - 40 segundo tramo la dispersión negativa del primer tramo de tal manera que la dispersión acumulada en los tramos primero y segundo sea aproximadamente cero,
 - en la que la fibra del segundo tramo es una fibra de dispersión desplazada a la mitad según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8.
- 45 10. Una línea de transmisión según la reivindicación 9 en la que una proporción de la longitud del primer tramo y la longitud del segundo tramo es menor de aproximadamente 6:1.
11. Una línea de transmisión según la reivindicación 9 en la que la dispersión positiva de la fibra (18) de dispersión desplazada a la mitad está entre aproximadamente 7 ps/nm/km y 10 ps/nm/km a la longitud de onda operativa.

12. Una línea de transmisión según la reivindicación 9 en la que el primer tramo de fibra (16) de dispersión negativa es una fibra que tiene una dispersión negativa elevada en el intervalo de -10 a -2 ps/nm/km.
13. Una línea de transmisión según la reivindicación 12 en la que el primer tramo de fibra (16) de dispersión negativa es una fibra que tiene una dispersión negativa elevada en el intervalo de -8 a -4 ps/nm/km.
- 5 14. Una línea de transmisión óptica que comprende:
- un primer tramo que incluye al menos una fibra monomodo (1B) que tiene una dispersión positiva a una longitud de onda operativa; y
- un segundo tramo acoplado al primer tramo, teniendo el segundo tramo al menos una fibra monomodo (18) que tiene una dispersión negativa a la longitud de onda operativa, compensando la dispersión negativa del segundo tramo la dispersión positiva del primer tramo de tal manera que la dispersión acumulada en los tramos primero y segundo sea aproximadamente cero,
- 10 en la que la fibra (18) del segundo tramo es una fibra de dispersión desplazada a la mitad según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8.
- 15 15. Una línea de transmisión según la reivindicación 14 en la que la fibra (96) del segundo tramo es una fibra de compensación de la dispersión que tiene una dispersión negativa en el intervalo de -300 a -50 ps/nm/km.
16. Una línea de transmisión según la reivindicación 15 en la que la fibra (96) del segundo tramo es una fibra de compensación de la dispersión que tiene una dispersión negativa en el intervalo de -50 a -10 ps/nm/km.

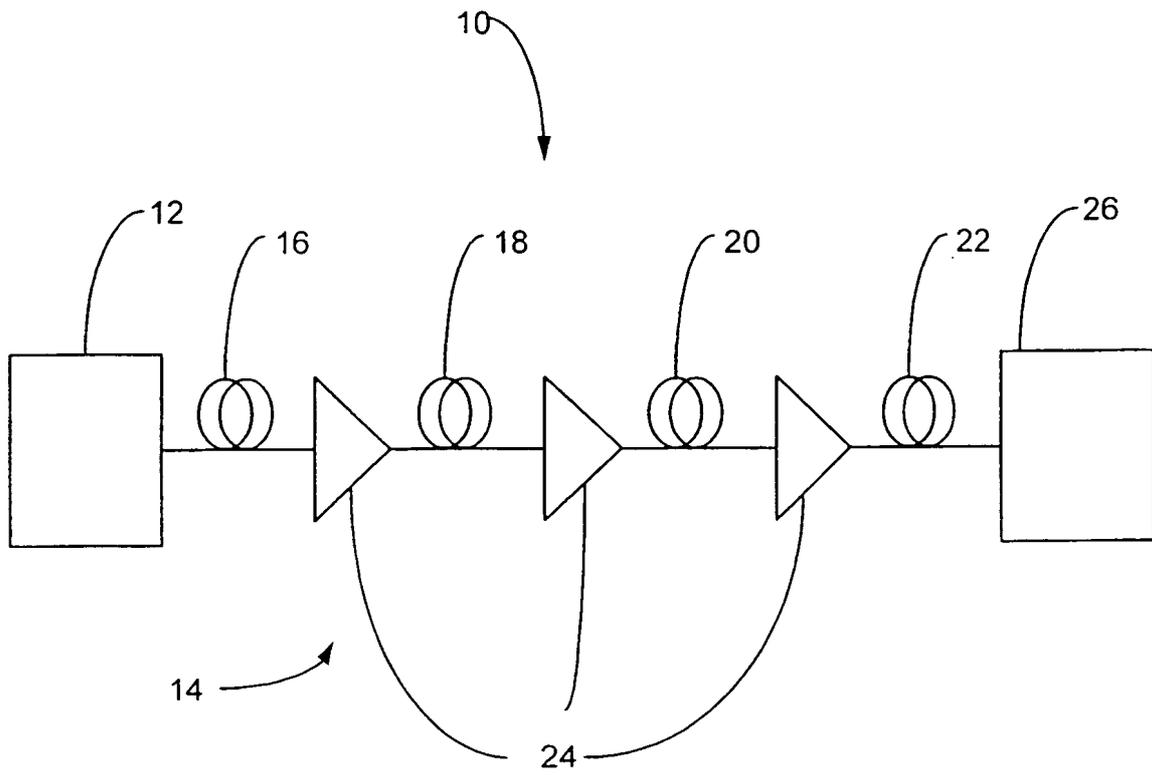


Fig. 1

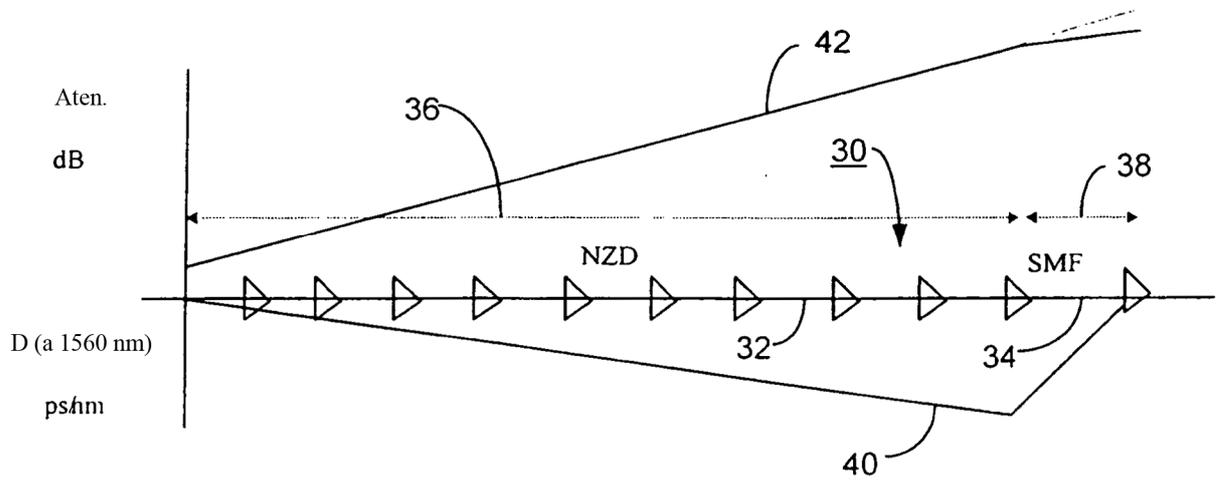


Fig. 2 – Técnica anterior

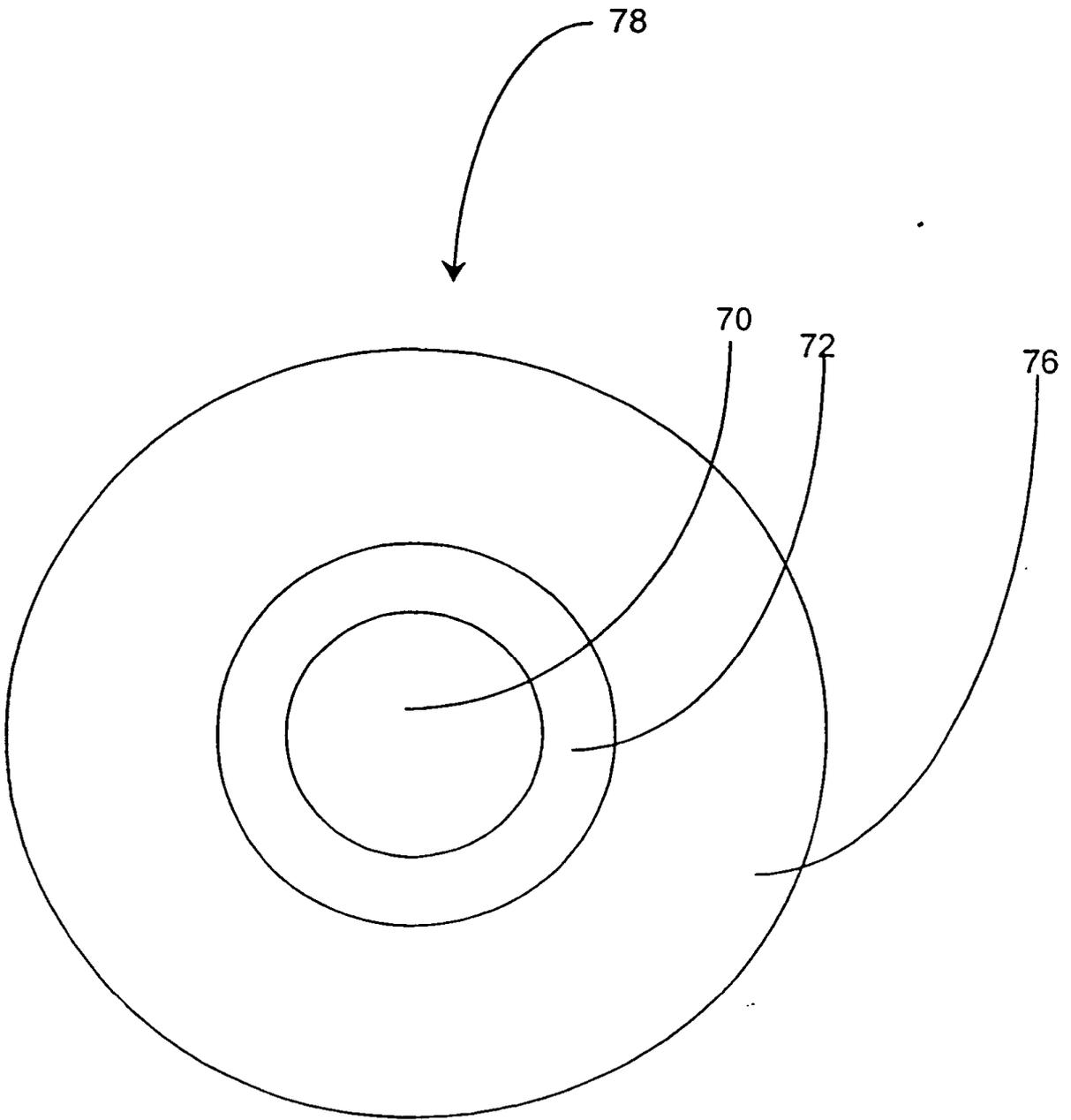


Fig. 3

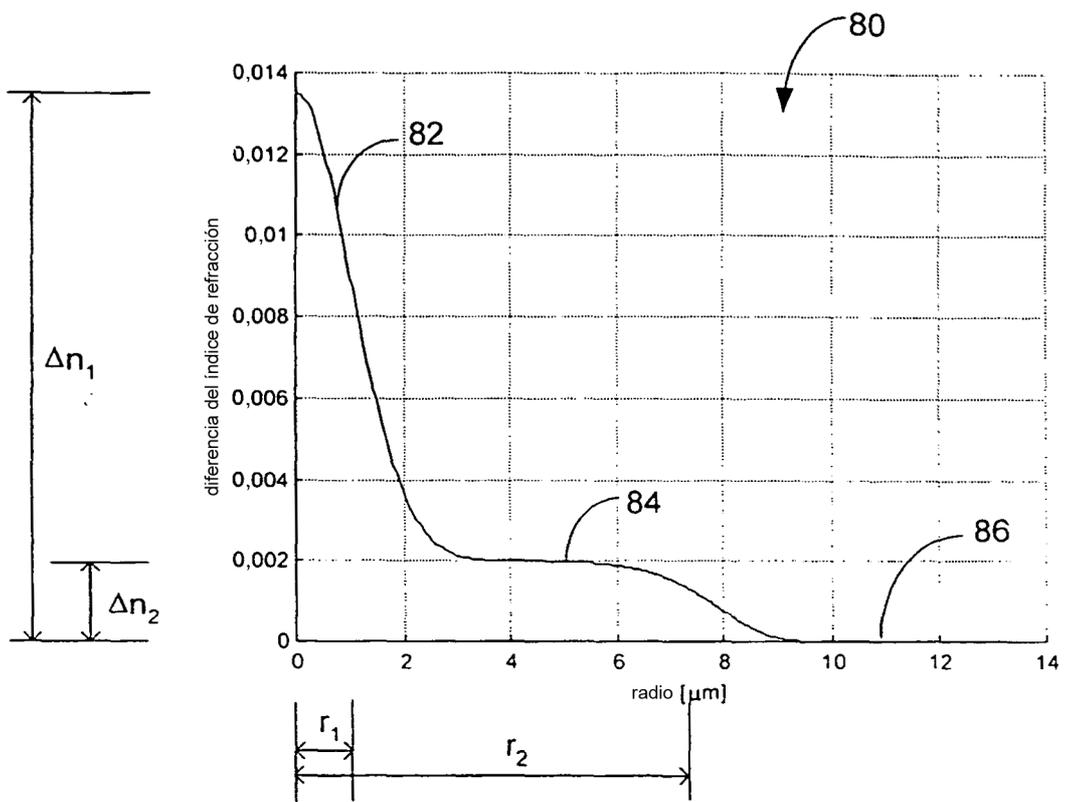


Fig. 4

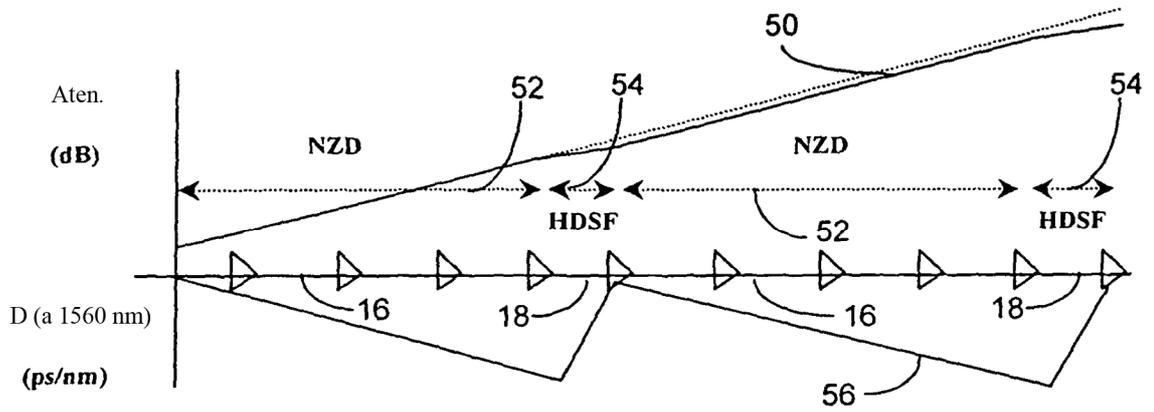


Fig. 5a

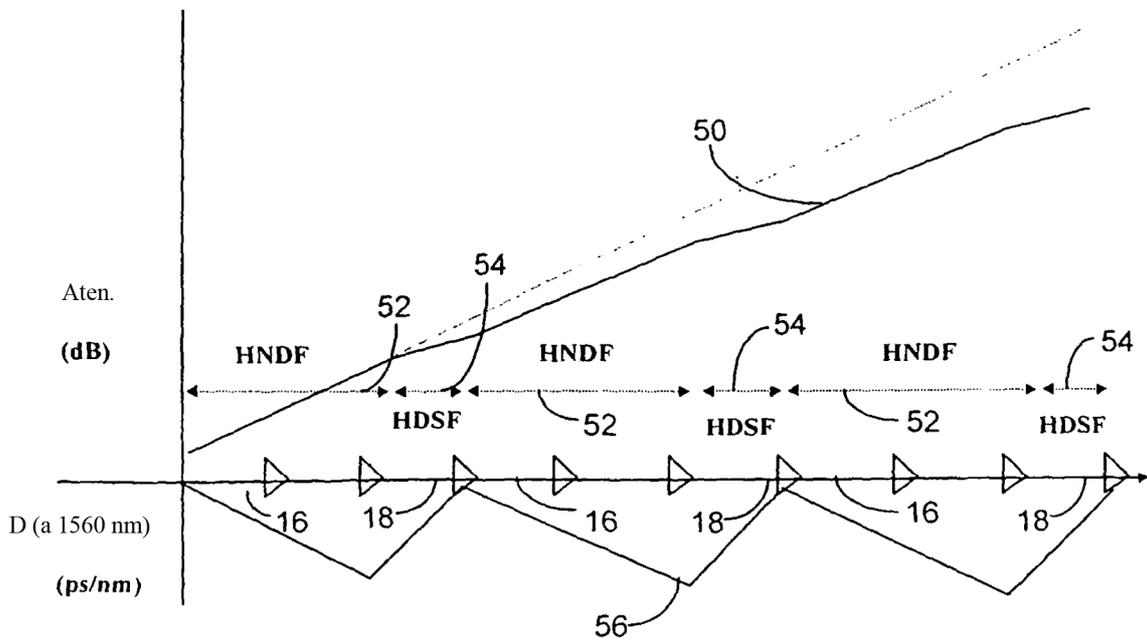


Fig. 5b

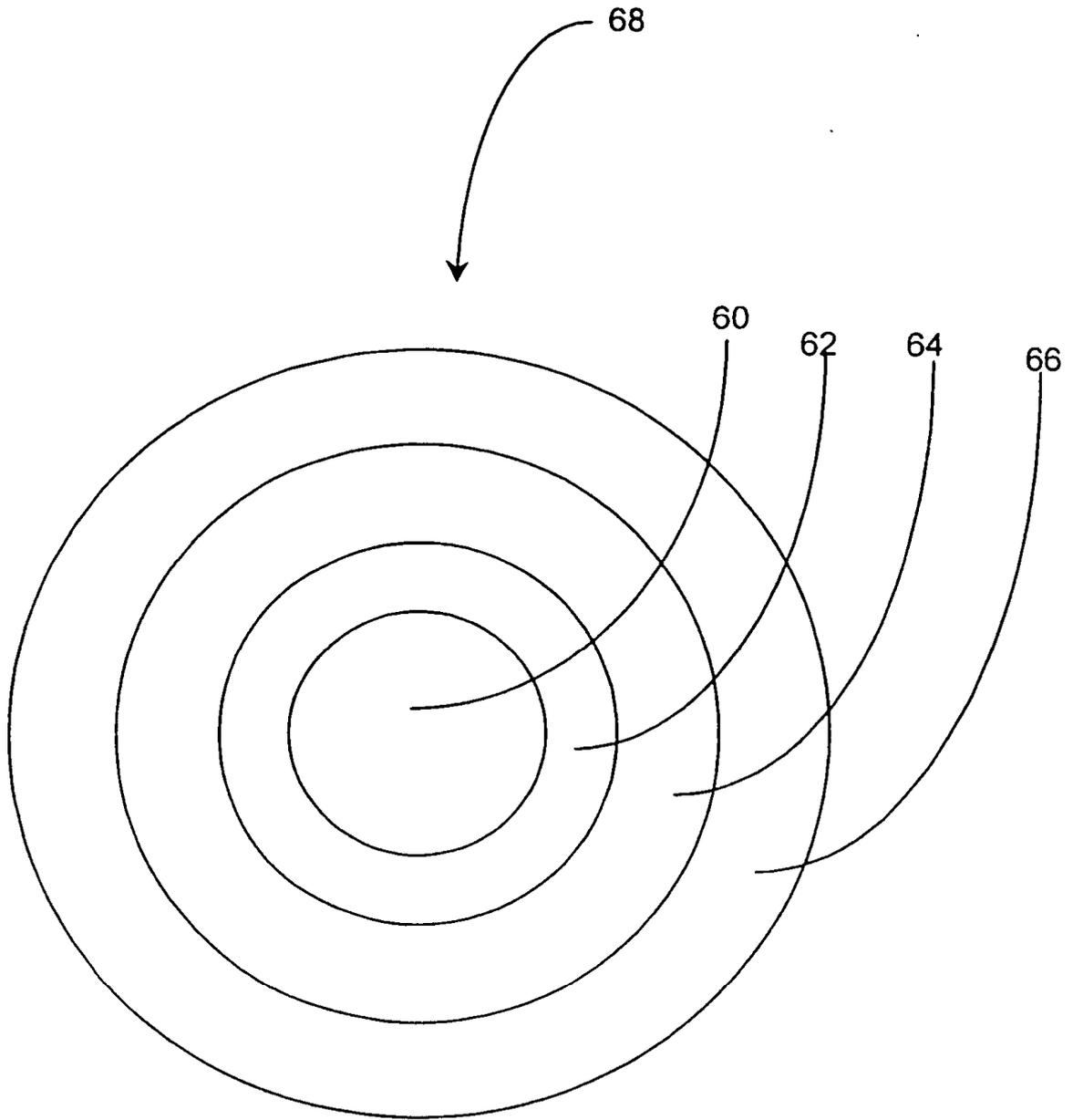


Fig. 6

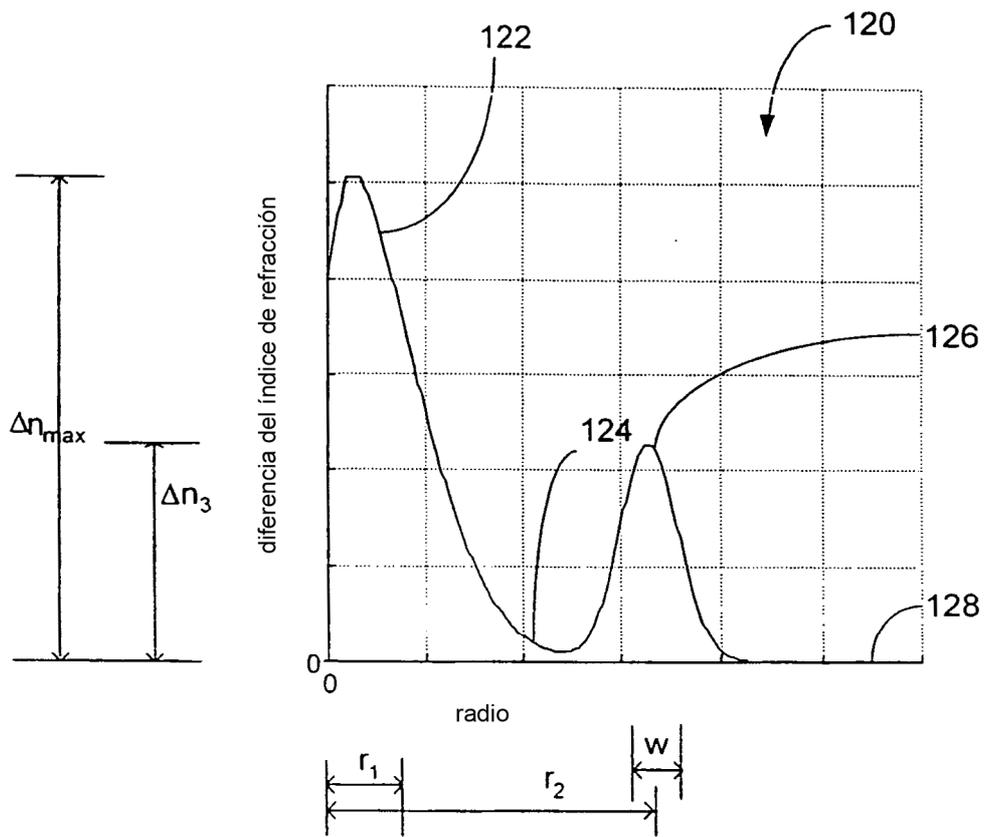


Fig. 7

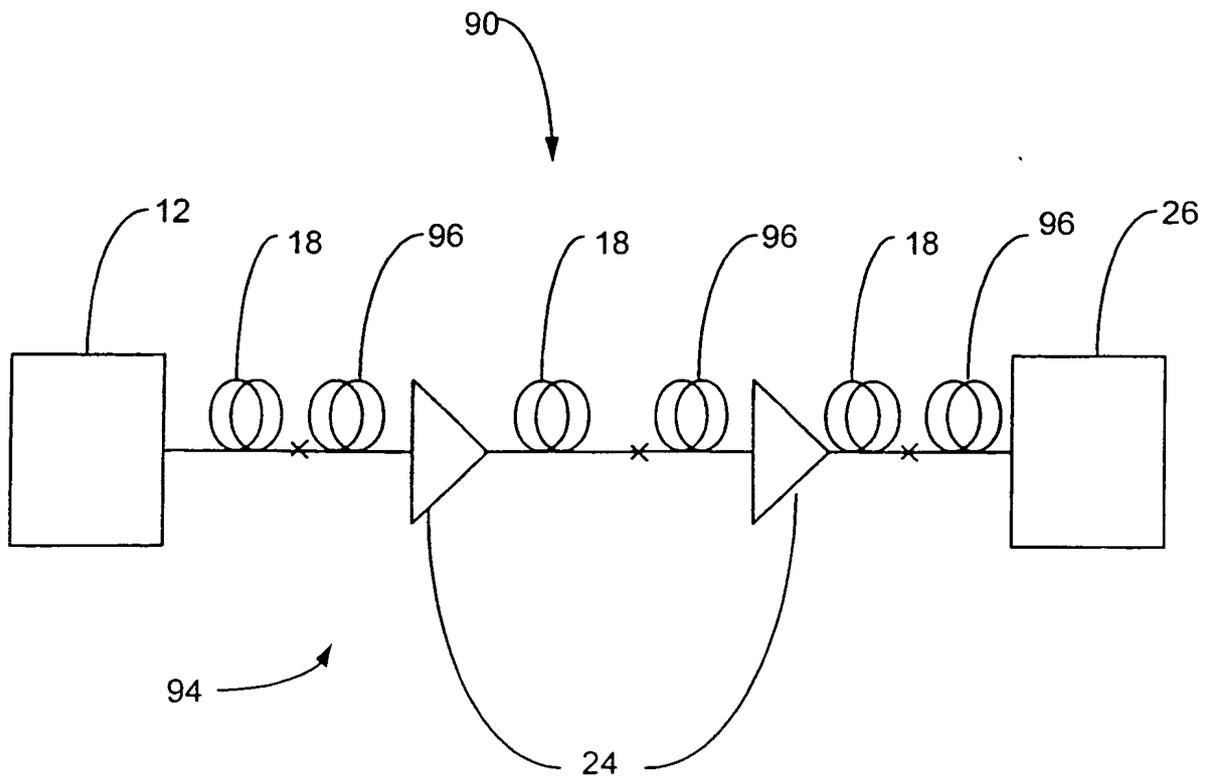


Fig. 8