(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 916 723**

(51) Int. CI.:

G02B 6/028 (2006.01)
G02B 6/036 (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.09.2019 E 19199739 (4)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.04.2022 EP 3637161**

(54) Título: **Fibras ópticas de pocos modos débilmente acopladas para la multiplexación por división de modo y sistema de transmisión óptica correspondiente**

(30) Prioridad:

08.10.2018 FR 1859325

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
05.07.2022

(73) Titular/es:

DRAKA COMTEQ FRANCE (100.0%)
23 Avenue Aristide Briand
89100 Paron, FR

(72) Inventor/es:

BIGOT, MARIANNE;
TRINEL, JEAN-BAPTISTE;
SILLARD, PIERRE y
DE MONTMORILLON, LOUIS-ANNE

(74) Agente/Representante:

DE ARPE TEJERO, Manuel

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

DESCRIPCIÓN

Fibras ópticas de pocos modos débilmente acopladas para la multiplexación por división de modo y sistema de transmisión óptica correspondiente

1. Campo de la divulgación

La presente divulgación se refiere al campo de la transmisión por fibra óptica y, más específicamente, a diseños mejorados de fibra de pocos modos para la multiplexación por división de modo.

2. Antecedentes

Una fibra óptica está constituida convencionalmente por un núcleo óptico, que transmite una señal óptica, y por un revestimiento óptico, que confina la señal óptica dentro del núcleo óptico. Para ese fin, el índice de refracción del núcleo, n_{co}, es mayor que el del revestimiento, n_{Cl}. Una fibra óptica está caracterizada en general por un perfil de índice de refracción que asocia el índice de refracción (n) con el radio (r) de la fibra óptica: la distancia r con respecto al centro de la fibra óptica se muestra en el eje x y la diferencia Δn entre el índice de refracción en el radio r, n(r), y el índice de refracción del revestimiento óptico n_{Cl} se muestra en el eje y.

Hoy en día, existen dos categorías principales de fibras ópticas: fibras multimodo y fibras monomodo. En una fibra multimodo, para una longitud de onda dada, varios modos ópticos se pueden propagar simultáneamente a lo largo de la fibra óptica, mientras que, en una fibra monomodo, los modos de orden superior (denominados, en lo sucesivo en el presente documento, HOM) están cortados o muy atenuados.

Las fibras monomodo se usan comúnmente para aplicaciones de larga distancia, tales como redes de acceso, redes metropolitanas o redes de largo alcance. Para obtener una fibra óptica capaz de transmitir una señal óptica monomodo, se requiere un núcleo con un diámetro relativamente pequeño (habitualmente, entre 5 µm y 13 µm). Para satisfacer los requisitos de las aplicaciones de alta velocidad o tasa de bits (por ejemplo, 10 Gbps), las fibras monomodo convencionales requieren el uso de un emisor de láser monomodo modulado sintonizado para funcionar habitualmente a una longitud de onda de 1550 nm. Sin embargo, las fibras monomodo adolecen de problemas de no linealidad, que son limitaciones importantes a la capacidad de transmisión de la fibra.

Las fibras multimodo se usan comúnmente para aplicaciones de corta distancia que requieren un ancho de banda alto, tales como las redes de área local (LAN) y las unidades de múltiples viviendas (MDU), más conocidas, en general, como redes en edificios. El núcleo de una fibra multimodo tiene habitualmente un diámetro de 50 µm o de 62,5 µm. Las fibras multimodo más predominantes en las telecomunicaciones son las fibras ópticas de perfil de índice gradual de refracción. Minimizando la dispersión intermodal (es decir, la diferencia entre los tiempos de retardo de propagación de los modos ópticos a lo largo de la fibra óptica, también denominados DMGD por Retardo de Grupo de Modo Diferencial), un perfil de índice de refracción de este tipo garantiza un alto ancho de banda modal para una longitud de onda dada.

Debido a que el tráfico de datos a través de redes de fibra óptica continúa creciendo exponencialmente, existe una demanda creciente para aumentar el tráfico por fibra, particularmente a través de largas distancias. Para este fin, se han desarrollado técnicas de multiplexación que permiten que una pluralidad de flujos de datos separados compartan la misma fibra óptica. Entre estas técnicas, un enfoque prometedor es la multiplexación por división en el espacio (SDM), en la que una pluralidad de canales de datos dentro de una única fibra óptica son proporcionados por una pluralidad respectiva de modos de señal óptica guiados por la fibra. Una técnica de este tipo ha requerido el desarrollo de nuevos tipos de fibras ópticas, denominadas fibras ópticas de pocos modos, que soportan más de un modo espacial pero menos modos espaciales que las fibras multimodo. Tales Fibras de Pocos Modos (FMF), que se analizan en particular en el documento de patente PCT WO2011/094400, soportan al menos dos modos de Polarización Lineal (LP).

Las transmisiones multiplexadas por división en el espacio que usan las FMF han recibido recientemente una atención considerable debido a su potencial para multiplicar la capacidad de las transmisiones monomodo por el número de modos que se usarán. Dependiendo del diseño de las FMF, los modos espaciales transmitidos se pueden acoplar, beneficiándose de un retardo de grupo acumulado relativamente bajo.

Un enfoque para el diseño de las FMF consiste en minimizar el acoplamiento de modos (denominado, en lo sucesivo en el presente documento, FMF débilmente acopladas) de tal modo que todos los modos de LP se pueden detectar simultáneamente sin una técnica de múltiples entradas - múltiples salidas (MIMO) o usando una técnica de MIMO sencilla 'de 2N x 2N' (siendo N, por ejemplo, el número total de modos espaciales que es igual a 1 o 2), independientemente del número de modos de LP, que es uno de los factores limitantes para salvar largas distancias. Por lo tanto, unas FMF débilmente acopladas de este tipo permiten una simplificación del procesamiento electrónico de la señal óptica.

Para asegurar un acoplamiento de calidad entre los modos espaciales, las FMF débilmente acopladas se diseñan de tal modo que la diferencia de índice eficaz mínima (denominada, en lo sucesivo en el presente documento, $\Delta n_{efic\ mín}$) entre modos espaciales subsiguientes (denominada, en lo sucesivo en el presente documento, diferencia de índice

eficaz entre modos mínima) es del valor más alto posible.

Aumentar la cantidad de modos de LP que se pueden usar realmente en las FMF débilmente acopladas es un problema desafiante frente al acoplamiento de modos y a las pérdidas para los modos de LP transmitidos.

Una forma de aumentar el número de modos espaciales sin reducir $\Delta n_{efic\ mín}$ sería aumentar el índice de refracción de núcleo. Sin embargo, esto conduciría a elevar la atenuación de las señales ópticas transmitidas, lo que no sería óptimo.

Hasta la fecha, los perfiles de núcleo de índice escalonado han demostrado estar muy bien adaptados a las FMF débilmente acopladas debido a que este tipo de perfil permite obtener una compensación recíproca entre:

- la diferencia de índice eficaz entre modos (que ha de ser tan alta como es posible: habitualmente, la diferencia de índice eficaz $\Delta n_{efic\ mín}$ más pequeña es más alta que $0,9 \times 10^{-3}$ entre dos modos de LP subsiguientes) para limitar el acoplamiento de modos; y
- el área eficaz A_{efic} de todos los modos espaciales (que ha de ser tan grande como es posible: habitualmente, A_{efic} superior a 80 μm^2) para limitar la no linealidad intramodo.

La publicación de la Sra. Bigot y col., por ejemplo, titulada "*Next-Generation Multimode Fibers for Space Division Multiplexing*", de 24-07-2017, desvela ejemplos de perfiles de núcleo de índice escalonado que han demostrado estar muy bien adaptados a las FMF débilmente acopladas. Los perfiles de índice experimentales se han medido a una longitud de onda de 655 nm. Por lo tanto, debido a la falta de resolución de la medición a esa longitud de onda, la medición experimental de campo cercano de refracción de un perfil escalonado de índice se "alisa" en la parte de arriba y en la base del perfil, al contrario que en un perfil escalonado de índice teórico que muestra una transición núcleo/revestimiento con una esquina en ángulo recto.

Además del problema de la atenuación de las señales ópticas, los diseñadores también han observado que las FMF débilmente acopladas - como las FMF de índice escalonado - adolecen de una diferencia de atenuación significativa entre los modos espaciales (también denominada DMA, por "Atenuación de Modo Diferencial, habitualmente cuando DMA > 0,05 dB/km), lo que afecta seriamente a la capacidad de transmisión. En ese caso, se ha de implementar un sistema de amplificación complejo para compensar las pérdidas asociadas. Más particularmente, DMA afecta a las pérdidas por dependencia de modo con pérdidas ópticas más altas para los modos de orden superior. Un origen de la atenuación superior de los modos de orden más alto puede ser su acoplamiento con los modos de revestimiento y con fugas y los efectos de microflexión. Otro origen de las pérdidas adicionales inesperadas que tienen lugar en los modos de orden más alto en los perfiles de índice escalonado podría ser una contribución relativamente alta del efecto de dispersión de luz de ángulo pequeño (SALS).

Un enfoque para reducir la DMA limitando el acoplamiento de los modos de orden alto con los modos de revestimiento y con fugas es actuar sobre el perfil de índice de refracción en la superficie de separación revestimiento/núcleo. Por ejemplo, el documento de patente US 2016/0306108 desvela una fibra de pocos modos, que tiene un núcleo de índice gradual y un revestimiento circundante que comprende una capa entre el núcleo y la zanja, una zanja dopada hacia abajo colindante con la capa y una región de revestimiento no dopada colindante con la zanja. El perfil de índice de refracción de la fibra está configurado para soportar al menos nueve modos de LP para la transmisión de una señal óptica multiplexada espacialmente. Aunque tales diseños son prometedores en términos de la DMA al minimizar el acoplamiento con los modos sin guiado, estos no están adaptados a las FMF de acoplamiento de modos bajo. De hecho, los perfiles de núcleo de índice gradual permiten dividir los modos de LP soportados por la fibra en grupos de modos cuyos modos dentro de un grupo de modos tienen el mismo índice eficaz. Por lo tanto, si las diferencias de índice eficaz entremedias de los grupos de modos están lo suficientemente lejos entre sí, el acoplamiento entre los grupos de modos puede ser bajo, pero los diferentes modos de LP dentro de un grupo de modos están acoplados fuertemente. Por lo tanto, este perfil de núcleo de índice gradual se usa para combinar tanto un Retardo de Grupo Diferencial bajo como una DMA baja entre los modos espaciales. Pero la compensación recíproca entre la DMA y el $\Delta n_{efic\ mín}$ no es lo suficientemente óptima (especialmente cuando se usan sistemas de detección óptica sin MIMO o con una técnica de MIMO sencilla (de 2 X 2 o de 4 X 4) que requiere un acoplamiento de modos bajo entre los modos de LP) y que requiere un hardware de transmisión complejo y costoso.

Por lo tanto, existe la necesidad de diseñar una FMF débilmente acoplada que muestre una diferencia de índice eficaz suficientemente alta entre los modos de LP al tiempo que se reduce la DMA, para potenciar la capacidad de transmisión de las señales ópticas multiplexadas espacialmente.

3. Sumario de la divulgación

En una realización particular de la presente divulgación, que no forma parte de la materia objeto reivindicada, se propone una fibra óptica que comprende un núcleo óptico rodeado por un revestimiento óptico, en la que el núcleo óptico tiene un perfil de índice de refracción $\Delta n(r)$ de una forma similar a un trapecio, como una función de una distancia radial r desde el centro del núcleo óptico, teniendo el núcleo óptico una parte central de radio R1, y una parte de transición va desde el radio R1 hasta un radio R2, de tal modo que R2 > R1, definiéndose dicho perfil de índice de refracción mediante:

- una integral de superficie $A_{núcleo}$ definida como sigue: $A_{\text{núcleo}} = 2\int_0^{R2} \Delta n(r).dr$
- una pendiente de transición S definida como sigue: $S = \left|\frac{\Delta n2-\Delta n1}{R2-R1}\right|$

  con:

  Δn1, la diferencia de índice de refracción de la parte central del núcleo óptico con respecto al revestimiento óptico exterior;
  Δn2, la diferencia de índice de refracción de una parte de revestimiento, adyacente al núcleo óptico, con respecto al revestimiento óptico exterior;

y en la que:

- la integral de superficie $A_{núcleo}$ está entre 180 × 10^{-3} y 270 × 10^{-3} µm;
- el radio R2 está entre 6,8 y 11,5 µm;
- la pendiente de transición S está entre 1,7 × 10^{-3} y 12 × 10^{-3} μm^{-1}.

Una fibra óptica de pocos modos débilmente acoplada de este tipo muestra una diferencia de índice de refracción eficaz suficientemente alta entre los modos espaciales, en comparación con las fibras FMF de la técnica anterior, al tiempo que se mantiene una atenuación de modo diferencial tan baja como es posible. La presente realización se basa en una forma similar a un trapecio de perfil de índice ingeniosa entre el revestimiento y el núcleo óptico, diseñada para disminuir los fenómenos de difusión en la superficie de separación núcleo/revestimiento, para disminuir notablemente la componente de SALS de la DMA. Una forma trapecial de este tipo permite reducir las pérdidas por dispersión adicionales en la FMF. Por lo tanto, en lugar de centrarse en los efectos de acoplamiento entre los modos de orden más alto y los modos de revestimiento, lo que penaliza la atenuación de los modos de orden superior como en las soluciones de la técnica anterior, la presente realización se basa en el diseño de perfil de índice para FMF que reduce la contribución de SALS para reducir la DMA.

Tal enfoque permite asimismo mejorar significativamente la compensación recíproca entre una diferencia de índice eficaz entre modos alta y una DMA baja. Habitualmente, una FMF débilmente acoplada de este tipo permite obtener una diferencia de índice eficaz entre modos $\Delta n_{efic\ mín}$ igual o superior a 0,9 × 10^{-3} en combinación con una DMA igual o inferior a 0,05 dB/km.

De acuerdo con una característica particular, la parte central del núcleo óptico se define mediante una integral de superficie $A_{núcleo}$, definida mediante las siguientes ecuaciones:

$$A_{\text{núcleo}} = 2\int_0^{R2} \Delta n(r).dr$$

De acuerdo con una característica particular, la diferencia de índice de refracción Δn1 está entre 13 × 10^{-3} y 18 × 10^{-3}.

De acuerdo con una característica particular, una relación R1 / R2 del radio de dicha parte central con respecto al radio de dicha parte de transición está entre 0,30 y 0,85.

Tal relación asegura obtener una FMF de acoplamiento de modos débil según se desee al tiempo que se mantiene la DMA tan baja como es posible.

De acuerdo con otra característica particular, la diferencia de índice de refracción Δn2 está entre -1 × 10^{-3} y 1 × 10^{-3} y, más particularmente, entre -0,5 × 10^{-3} y 0,5 × 10^{-3}.

De acuerdo con la invención, la parte central del núcleo óptico comprende una región de índice de refracción hundido, denominada núcleo hundido interior, que va desde el centro del núcleo óptico hasta el radio R0 y que tiene una diferencia de índice de refracción con respecto al revestimiento óptico exterior Δn0 de tal modo que Δn1 > Δn0 ≥ (Δn1 - 6 × 10^{-3}).

La adición de tal porción de índice de refracción hundido en la parte central del núcleo óptico (núcleo hundido interior) permite reajustar la diferencia de índice de refracción eficaz entre modos Δn_{efic} para asegurar una separación adecuada entre los modos espaciales que se guían en la FMF, aumentando de ese modo la capacidad de transmisión de las señales ópticas multiplexadas espacialmente, en comparación con las FMF de la técnica anterior.

De acuerdo con la invención, el núcleo hundido interior tiene una integral de superficie A_0 y suponiendo una integral de superficie A_{trampa} como la integral de superficie del perfil de índice de refracción del núcleo sin hundir, definiéndose dichas integrales de superficie A_0 y A_{trampa} como sigue:

$$A_0 = 2\int_0^{R0} (\Delta n1 - \Delta n(r))dr$$

$$A_{trampa} = 2\left(\Delta n1 \cdot R1 + \int_{R1}^{R2} \Delta n(r)dr\right)$$

con una relación A_0 / A_{trampa} inferior o igual a 0,1.

Por lo tanto, con una relación de este tipo, se mejora más la compensación recíproca entre la DMA y la diferencia de índice eficaz entre modos.

De acuerdo con otra característica particular, la pendiente de transición S satisface la siguiente desigualdad:

$$S \geq J\left(\frac{A_0}{A_{trampa}}\right)^2 + K\left(\frac{A_0}{A_{trampa}}\right) + L$$

con J = 650 × 10^{-3} μm^{-1}, K = -78 × 10^{-3} μm^{-1} y L = 4,0 × 10^{-3} μm^{-1}.

Un perfil de este tipo permite obtener una diferencia de índice eficaz entre modos $\Delta n_{efic\ mín}$ mejorada igual o superior a 0,9 × 10^{-3}.

De acuerdo con otra característica particular, la pendiente de transición S satisface la siguiente desigualdad:

$$S \geq J\left(\frac{A_0}{A_{trampa}}\right)^2 + K\left(\frac{A_0}{A_{trampa}}\right) + L$$

con J = 1900 × 10^{-3} μm^{-1}, K = -209 × 10^{-3} μm^{-1} y L = 7,6 × 10^{-3} μm^{-1}.

Un perfil de este tipo permite obtener una diferencia de índice eficaz entre modos $\Delta n_{efic\ mín}$ más mejorada igual o superior a 1,3 × 10^{-3}.

De acuerdo con otra característica particular, la pendiente de transición S satisface la siguiente desigualdad:

$$S \geq J\left(\frac{A_0}{A_{trampa}}\right)^2 + K\left(\frac{A_0}{A_{trampa}}\right) + L$$

con J = 5800 × 10^{-3} μm^{-1}, K = -580 × 10^{-3} μm^{-1} y L = 17 × 10^{-3} μm^{-1}.

Un perfil de este tipo permite obtener una diferencia de índice de refracción eficaz entre modos $\Delta n_{efic\ mín}$ aún más mejorada igual o superior a 1,5 × 10^{-3}.

De acuerdo con otra característica particular, cada modo de polarización lineal guiado por dicha fibra óptica tiene un área eficaz A_{efic}, de tal modo que A_{efic} > 80 μm^{-2}.

Un área eficaz de este tipo limita la no linealidad intramodo en la FMF.

De acuerdo con un aspecto particular de la invención, en la fibra óptica se guían al menos cinco modos de polarización lineal.

De acuerdo con otra característica particular, una atenuación de modo diferencial, DMA, para todos los modos guiados por dicha fibra óptica, es de tal modo que: DMA ≤ 0,050 dB/km y, más particularmente, DMA ≤ 0,020 dB/km.

De acuerdo con otra característica particular, la parte de transición del perfil de índice de refracción de núcleo similar a un trapecio comprende al menos un material dopante de una concentración que cambia gradualmente como una función de la distancia radial r desde una concentración en la parte central del núcleo óptico a una concentración en dicha parte de revestimiento adyacente al núcleo óptico.

Por lo tanto, la aplicación de una transición suave de uno o varios dopantes se puede usar en el núcleo de fibra para crear la parte de transición del perfil de índice de núcleo (que va desde el radio R1 al radio R2).

De acuerdo con otra característica particular, dicho al menos un material dopante pertenece al grupo que comprende: óxido de germanio, óxido de fósforo, óxido de boro, flúor u otro material dopante que afecte al índice de refracción de la sílice.

De acuerdo con otra característica particular, el revestimiento óptico tiene un índice de refracción entre 1,437 y 1,458.

Otro aspecto de la divulgación se refiere a un sistema óptico que comprende al menos una fibra óptica como se ha descrito anteriormente en el presente documento en cualquiera de sus realizaciones.

4. Lista de figuras

Otras características y ventajas de las realizaciones de la presente divulgación deberán aparecer a partir de la siguiente descripción, dada por medio de ejemplos indicativos y no exhaustivos y a partir de los dibujos adjuntos. Solo la segunda realización está cubierta por la reivindicación independiente. Otras partes de la descripción indicadas como primera realización no caen dentro del ámbito de las reivindicaciones, pero se consideran útiles para entender la invención.

- **La figura 1** representa gráficamente el perfil de índice de refracción de una FMF débilmente acoplada ilustrativa de acuerdo con la primera realización de la presente divulgación;
- **la figura 2** representa gráficamente el perfil de índice de refracción de una FMF débilmente acoplada ilustrativa de acuerdo con la segunda realización de la presente divulgación;
- **la figura 3** ilustra una gráfica que muestra el impacto de la pendiente de transición del perfil de índice trapecial y de la relación A_0 / A_{trampa} sobre la diferencia de índice entre modos $\Delta n_{efic\ mín}$ de la FMF.

5. Descripción detallada

El principio general de la presente divulgación se basa en un enfoque novedoso e inventivo de diseño de FMF con una transición suave del perfil de índice de refracción desde el núcleo óptico hasta el revestimiento, de tal modo que las pérdidas por dispersión de luz adicionales en la FMF se reducen significativamente al tiempo que se mantiene una FMF débilmente acoplada. Más exactamente, el fin de un diseño de este tipo es optimizar el perfil de índice de refracción del núcleo óptico, para que la FMF sea capaz de guiar una pluralidad de modos espaciales débilmente acoplados (habitualmente, al menos cinco modos de LP con una diferencia de índice de refracción eficaz entre modos mínima $\Delta n_{efic\ mín}$ igual a o mayor que $0{,}9 \times 10^{-3}$) al tiempo que tiene menos DMA con respecto a las FMF de la técnica anterior (habitualmente, una DMA inferior a 0,05 dB/km).

La luz que se desplaza por una fibra óptica en realidad forma modos de tipo híbrido que, habitualmente, se denominan modos de LP (polarización lineal). Los modos de LP_{0p} tienen dos grados de libertad de polarización y se degeneran dos veces, los modos de LP_{mp} con $m \geq 1$ se degeneran cuatro veces. Estas degeneraciones no se cuentan cuando se designa el número de modos de LP que se propagan en la fibra. Por lo tanto, una fibra óptica de pocos modos que tiene dos modos de LP soporta la propagación de la totalidad de los modos de LP_{01} y de LP_{11}, o una fibra de pocos modos que guía seis modos de LP soporta la propagación de la totalidad de los modos de LP_{01}, de LP_{11}, de LP_{02}, de LP_{21}, de LP_{12} y de LP_{31}.

A continuación se hará referencia con detalle a realizaciones de fibras ópticas de pocos modos, que se ilustran en los dibujos adjuntos. Siempre que sea posible, se usarán los mismos números de referencia de principio a fin de los dibujos para hacer referencia a partes iguales o semejantes.

Por lo tanto, la descripción propone dos realizaciones ilustrativas para obtener la compensación recíproca deseada entre el $\Delta n_{efic\ mín}$ y la DMA: una FMF débilmente acoplada de perfil de índice trapecial y una FMF débilmente acoplada asistida por un núcleo hundido interior. La segunda realización se detalla posteriormente en la descripción.

Como se usa en el presente documento, $\Delta n_{efic\ mín}$ significa el valor mínimo de la diferencia de índice eficaz, en valor absoluto, entremedias de dos modos de LP subsiguientes guiados en la fibra óptica, y Δn_{efic} es la diferencia de índice eficaz de un modo de LP dado con respecto al índice de refracción de revestimiento.

> FMF débilmente acoplada de núcleo sin hundir

La **figura 1** representa el perfil de índice de refracción n(r) de una fibra óptica de acuerdo con la primera realización.

Este describe la relación entre la diferencia de índice de refracción Δn como una función de la distancia radial r, expresada en micrómetros, desde el centro de la fibra óptica. El eje x representa la posición radial, representando x = 0 el centro del núcleo óptico, y el eje y representa el índice de refracción, expresado como una diferencia de índice de refracción Δn. Como se usa en el presente documento, la expresión "diferencia de índice de refracción" no excluye una diferencia de índice de refracción de cero.

La fibra óptica tiene un núcleo óptico rodeado por un revestimiento óptico y un recubrimiento que rodea el revestimiento. El recubrimiento puede comprender varias capas; por ejemplo, el recubrimiento puede ser un recubrimiento de doble capa. El revestimiento está formado por dos porciones: una porción intermedia adyacente al núcleo óptico y una porción exterior (también denominadas revestimiento intermedio y revestimiento exterior, respectivamente).

En esta realización particular, el perfil de índice de refracción tiene forma trapecial, y presenta (empezando desde el centro de la fibra):

- una parte central del núcleo óptico que tiene un radio R1 y una diferencia de índice de refracción Δn1 sustancialmente constante con respecto al revestimiento exterior;
- una parte anular del núcleo óptico, en la que el índice de refracción disminuye, de forma sustancialmente lineal,

hasta la distancia radial R2 desde el índice de la parte central del núcleo óptico al índice del revestimiento intermedio;
- un revestimiento intermedio que tiene un radio R3 y una diferencia de índice de refracción Δn2 sustancialmente constante con respecto al revestimiento exterior;
- un revestimiento exterior que va desde el radio R3 hasta el extremo de la parte de vidrio de la FMF.

De principio a fin del presente documento, la porción anular mencionada anteriormente del núcleo óptico también se denomina "parte de transición" del perfil de índice similar a un trapecio del núcleo.

Por lo tanto, la fibra en su conjunto constituye una fibra que tiene un así denominado perfil "similar a un trapecio".

Debido a que la sección transversal de la FMF mostrada en la figura 1 presenta una simetría circular con respecto al centro del núcleo óptico, el perfil de índice de refracción del núcleo resultante tiene forma de trapecio isósceles (el perfil de índice tiene una forma simétrica con respecto al centro del núcleo óptico (el eje y)).

Como se ha expuesto anteriormente, la parte central del perfil del núcleo tiene una diferencia de índice de refracción Δn1 sustancialmente constante con respecto al revestimiento exterior (n_{cl}), la parte de transición del perfil del núcleo tiene una diferencia de índice de refracción que disminuye de forma sustancialmente lineal con respecto a la distancia radial. Esta disminución lineal se define de acuerdo con una pendiente S, así denominada "pendiente de transición", definida mediante la siguiente ecuación:

$$S = \left|\frac{\Delta n2 - \Delta n1}{R2 - R1}\right|$$

En lo sucesivo en el presente documento, cada sección o parte del perfil de fibra óptica se define usando integrales de superficie. El término "superficie" no se debería entender en un sentido geométrico sino que, más bien, se debería entender como el área bajo la curva de perfil que tiene dos dimensiones (expresada, en el presente caso, en micrómetros).

De acuerdo con esta realización, la parte central del núcleo óptico se define mediante una integral de superficie $A_{núcleo}$, definida mediante la siguiente ecuación:

$$A_{\text{núcleo}} = 2\int_0^{R2} \Delta n(r).\, dr$$

Los parámetros de fibra, tales como los radios R1 y R2 o las diferencias de índice de refracción Δn1 y Δn2, se eligen para tener una integral de superficie $A_{núcleo}$ que varía en un rango predeterminado de valores.

Habitualmente, la FMF de acuerdo con esta realización ilustrativa tiene además las siguientes propiedades:

- una integral de superficie $A_{núcleo}$ del perfil de índice del núcleo que varía entre 180×10^{-3} y 270×10^{-3} µm;
- una relación R1 / R2 del radio de la parte central con respecto al radio de la parte de transición que varía entre 0,30 y 0,85;
- un radio de la parte de transición R2 que varía entre 6,8 y 11,5 µm;
- una diferencia de índice de refracción Δn1 que varía entre 13×10^{-3} y 18×10^{-3};
- una diferencia de índice de refracción Δn2 que varía entre -1×10^{-3} y 1×10^{-3} y, más particularmente, entre $-0{,}5 \times 10^{-3}$ y $0{,}5 \times 10^{-3}$;
- una pendiente de transición S que varía entre $1{,}7 \times 10^{-3}$ y 12×10^{-3} μm^{-1}.

Gracias a estos parámetros de perfil, las FMF son capaces de guiar al menos cinco modos de LP al tiempo que se muestra una compensación recíproca optimizada entre el $\Delta n_{efic\ mín}$ y la DMA. Tales parámetros de perfil permiten asimismo obtener un acoplamiento de modos bajo (es decir, una diferencia de índice de refracción eficaz entre modos mínima $\Delta n_{efic\ mín}$ aumentada) y una DMA baja.

Por "acoplamiento de modos bajo", se pretende indicar la diferencia de índice de refracción eficaz entre modos mínima $\Delta n_{efic\ mín} \geq 0{,}9 \times 10^{-3}$, y por "DMA baja", se pretende indicar la atenuación de modo diferencial DMA ≤ 0,050 dB/km.

Una forma de perfil trapecial de este tipo se logra a través de un cambio gradual en la concentración de uno o varios materiales dopantes en la parte de transición del núcleo óptico desde R1 a R2. El cambio gradual en la concentración de dopante se basa en el valor deseado de la pendiente de transición S (definida anteriormente). Se pueden usar muchos dopantes, tales como, por ejemplo, germanio y fósforo, que permiten ambos aumentar el índice de refracción, y boro y flúor, que permiten ambos disminuir el índice de refracción. El experto en la materia entenderá fácilmente que estos dopantes (excepto el flúor) están presentes en la matriz de sílice en forma de óxidos. Por lo tanto, el uso de germanio como dopante significa, por ejemplo, el uso de dióxido de germanio (GeO_2).

> FMF débilmente acoplada con núcleo hundido interior

La figura 2 representa el perfil de índice de refracción n(r) de una fibra óptica de acuerdo con la segunda realización, que es parte de la presente invención. La figura 2 se diferencia de la figura 1 en la presencia de un núcleo hundido interior dimensionado ingeniosamente en el perfil de índice de refracción de la FMF, para garantizar una separación adecuada entre los modos de LP guiados en la fibra.

Como se muestra en la figura, la parte central del perfil de núcleo comprende una región de índice de refracción hundido, denominada núcleo hundido interior, que va desde el centro del núcleo óptico hasta el radio R0 y que tiene una diferencia de índice de refracción Δn0 sustancialmente constante con respecto al revestimiento exterior (n_{cl}) de tal modo que: n1 > n0 ≥ (n1 - 6 × 10^{-3}). La adición de un núcleo hundido interior de este tipo en la parte central del núcleo óptico, como se muestra en la figura 2, permite reajustar la diferencia de índice eficaz entre modos Δn_{efic} y mejorar la capacidad de transmisión de las señales ópticas multiplexadas espacialmente, en comparación con las FMF de la técnica anterior. Por lo tanto, en esta realización ilustrativa, el perfil trapecial del núcleo se trunca de algún modo en su centro con una región de índice de refracción hundido para mejorar el acoplamiento de modos de la FMF. Una zanja de este tipo tiene, por ejemplo, un radio exterior R0 de entre 0,8 μm y R1 - 0,8 μm.

Como se usa en el presente documento, el término "núcleo hundido interior" se usa para designar una porción radial de la fibra óptica que tiene un índice de refracción menor que el índice de refracción de la parte central del núcleo óptico.

En lo sucesivo en el presente documento, cada sección o parte del perfil de fibra óptica se define de nuevo usando integrales de superficie. El término "superficie" no se debería entender en un sentido geométrico sino que, más bien, se debería entender como el área bajo la curva de perfil que tiene dos dimensiones (expresada, en el presente caso, en micrómetros).

De acuerdo con la invención, el núcleo hundido interior se define mediante una integral de superficie A_0 como sigue:

$$A_0 = 2\int_0^{R0} (\Delta n1 - \Delta n(r))dr$$

Considerando a continuación la integral de superficie A_{trampa} como la integral de superficie del perfil de índice de refracción del núcleo sin zanja, definida mediante la siguiente ecuación:

$$A_{trampa} = 2\left(\Delta n1 \cdot R1 + \int_{R1}^{R2} \Delta n(r)dr\right)$$

De acuerdo con la invención, la parte central del núcleo óptico se define mediante la siguiente integral de superficie $A_{núcleo}$:

$$A_{núcleo} = 2\int_0^{R2} \Delta n(r).\,dr = A_{trampa} - A_0$$

Las integrales de superficie A_0 y A_{trampa} se eligen para tener una relación A_0 / A_{trampa} inferior o igual a 0,1.

Con una relación de este tipo, se mejora aún más la compensación recíproca entre la DMA y el $\Delta n_{efic\ mín}$.

Se debería hacer notar que una relación elegida con A_0 igual a cero vuelve a mostrar el perfil de índice de la primera realización. También se debería hacer notar que las propiedades analizadas anteriormente en relación con la figura 1 (R1 / R2, R2, Δn1, Δn2, S) son, de nuevo, de aplicación en el presente caso para esta segunda realización ilustrativa.

Los inventores de la presente invención descubrieron adicionalmente que la pendiente y la relación A_0 / A_{trampa} tener un efecto sobre la diferencia de índice de refracción eficaz entre modos Δn_{efic}, y desarrollaron la siguiente desigualdad para garantizar un guiado de al menos cinco modos de LP con un acoplamiento de modos bajo, al tiempo que se mantiene baja la DMA (es decir, DMA ≤ 0,050 dB/km):

$$S \geq J\left(\frac{A_0}{A_{trampa}}\right)^2 + K\left(\frac{A_0}{A_{trampa}}\right) + L$$

con J = 650 × 10^{-3} μm^{-1}, K = -78 × 10^{-3} μm^{-1} y L = 4,0 × 10^{-3} μm^{-1} para obtener $\Delta n_{efic\ mín} \geq 0$, × 10^{-3} (denominado 'Criterio 1'); o
con J = 1900 × 10^{-3} μm^{-1}, K = -209 × 10^{-3} μm^{-1} y L = 7,6 × 10^{-3} μm^{-1} para obtener $\Delta n_{efic\ mín} \geq 1{,}3 \times 10^{-3}$ (denominado 'Criterio 2'); o
con J = 5800 · 10^{-3} μm^{-1}, K = -580 × 10^{-3} μm^{-1} y L = 17 × 10^{-3} μm^{-1} para obtener $\Delta n_{efic\ mín} \geq 1{,}5 \times 10^{-3}$ (denominado 'Criterio 3').

Se pueden usar dopantes en la matriz de sílice, tales como, por ejemplo, dióxido de boro y/o flúor, para disminuir el

índice de refracción con respecto al índice de refracción (n_{co}) de la parte central del núcleo para obtener el núcleo hundido interior con la diferencia de índice Δn0 deseada. Se dice que esta porción del núcleo está "dopada hacia abajo" con respecto a la parte central del núcleo.

Como alternativa, la concentración de dopantes que aumentan el índice de refracción, tales como, por ejemplo, óxido de germanio y/u óxido de fósforo, es menor en el núcleo hundido interior, que tiene una diferencia de índice Δn0, que en la parte central del núcleo, que tiene una diferencia de índice Δn1 desde R0 a R1.

La **figura 3** ilustra una gráfica que muestra el impacto de la pendiente de transición S del perfil de índice trapecial sobre el $\Delta n_{efic\ mín}$ de la FMF. Esta gráfica muestra la relación entre la pendiente S del perfil de índice trapecial (el eje y) como una función de la relación de integrales de superficie A_0 / A_{trampa} (el eje x) (representando x = 0 la primera realización ilustrativa y representando x > 0 la segunda realización ilustrativa). Las curvas 10, 20 y 30 representan las curvas obtenidas por simulación numérica con parámetros de fibra que dan, respectivamente, las siguientes diferencias de índice eficaz entre modos mínimas: $\Delta n_{efic\ mín} \geq 0{,}9 \times 10^{-3}$ (línea continua), $\Delta n_{efic\ mín} \geq 1{,}3 \times 10^{-3}$ (línea discontinua) y $\Delta n_{efic\ mín} \geq 1{,}5 \times 10^{-3}$ (línea de puntos). Los puntos negros, círculos negros y estrellas negras en la gráfica son ejemplos de la Tabla 1 analizada a continuación, que satisfacen, respectivamente, las siguientes condiciones: $\Delta n_{efic\ mín} \geq 0{,}9 \times 10^{-3}$, $\Delta n_{efic\ mín} \geq 1{,}3 \times 10^{-3}$ y $\Delta n_{efic\ mín} \geq 1{,}5 \times 10^{-3}$.

La **Tabla 1** da los parámetros de los perfiles de índice de doce ejemplos de FMF de acuerdo con las realizaciones ilustrativas de las figuras 1 (el Ejemplo 1) que no forman parte de la presente invención y 2 (del Ejemplo 2 al Ejemplo 12) de acuerdo con la invención. Los parámetros de perfil se establecieron a una longitud de onda de 633 nm.

Tabla 1

Ejemplos	R0	R1	R2	R3	Δn0	Δn1	Δn2	Anúcleo	A0 / Atrampa	s	r	ncl
	(µm);	(µm)	(µm)	(µm)	(10-3)	(10-3)	(10-3)	(10-3 × µm)		(10-3 / µm)		
Ej. 1	-	5,54	8,54	19,15	-	13,5	0	190	0,000	4,5	0,65	1,4573
Ej. 2	1,05	4,93	9,30	19,75	14,7	16,7	-0,2	234	0,017	3,9	0,53	1,4573
Ej. 3	1,55	6,51	9,30	19,75	14,2	16,2	-0,2	250	0,023	5,9	0,70	1,4573
Ej. 4	4,55	5,46	10,30	19,75	14,2	16,2	-0,2	237	0,071	3,4	0,53	1,4573
Ej. 5	1,55	4,93	9,30	19,75	14,7	16,7	-0,2	232	0,025	3,9	0,53	1,4573
Ej. 6	3,55	5,19	9,80	19,75	14,7	16,7	-0,2	236	0,056	3,7	0,53	1,4573
Ej. 7	3,55	5,46	10,30	19,75	14,2	16,2	-0,2	241	0,055	3,4	0,53	1,4573
Ej. 8	2,05	6,51	9,30	19,75	14,7	16,7	-0,2	256	0,030	6,1	0,70	1,4573
Ej. 9	3,05	6,86	9,80	19,75	14,2	16,2	-0,2	258	0,044	5,6	0,70	1,4573
Ej. 10	1,40	6,99	9,57	19,75	10,7	15,7	-0,2	249	0,053	6,1	0,73	1,4573
Ej. 11	3,57	5,94	10,62	19,7S	12,7	15,7	-0,2	241	0,081	3,4	0,56	1,4573
Ej. 12	3,55	5,46	10,30	19,75	14,2	16,2	0,2	241	0,055	3,4	0,53	1,4411

Se debería hacer notar que solo el 1er ejemplo (el Ejemplo 1) ilustra el ejemplo de la figura 1 (es decir, la FMF débilmente acoplada sin hundir), mientras que los otros once ejemplos (del Ejemplo 2 al Ejemplo12) ilustran el ejemplo de la figura 2 (es decir, la FMF débilmente acoplada de núcleo hundido interior). El 12º ejemplo (el Ejemplo 12) ilustra un perfil trapecial idéntico al del 7º ejemplo (el Ejemplo 7) pero con un índice de refracción n_{cl} de 1,4411 y una diferencia de índice de refracción Δn1 cercana a la de la sílice. Los resultados obtenidos con estos parámetros de perfil se establecen posteriormente en la Tabla 2.

Como se ha analizado anteriormente en relación con los antecedentes de la invención, DMA afecta a las pérdidas por dependencia de modo con pérdidas ópticas más altas para los modos de orden superior. Un origen de la DMA alta puede ser debido al acoplamiento de los modos de orden más alto con los modos de revestimiento o con fugas cuando los índices eficaces de los modos de orden superior están demasiado cerca del índice de refracción del revestimiento. Pero, cuando la diferencia de índice eficaz entre el modo de orden superior y los modos de revestimiento es lo suficientemente alta (preferentemente, mayor que 0,8 X 10^{-3}), los inventores de la presente invención atribuyen el origen de las pérdidas adicionales inesperadas que tienen lugar para los modos de orden más alto a las contribuciones de la dispersión de luz de ángulo pequeño (SALS). Para cada modo de LP guiado en la FMF a una longitud de onda de 1550 nm, más del 70 % de las pérdidas son debidas a la dispersión por efecto Rayleigh. Las pérdidas restantes cubren, por un lado, las pérdidas inducidas por mecanismos de absorción (junto a pérdidas por pico de OH, pérdidas por infrarrojo y por ultravioleta) y, por otro lado, las pérdidas inducidas por SALS. Se considera que la DMA es la diferencia en términos de pérdidas (que comprenden las pérdidas por efecto Rayleigh, las pérdidas por absorción y las pérdidas por SALS) entre el modo de LP que tiene las pérdidas más altas y el modo de LP que tiene las pérdidas más bajas.

Uno de los fines de la invención es reducir en la medida de lo posible la componente de SALS de la DMA para potenciar la capacidad de transmisión de las señales ópticas multiplexadas espacialmente en las FMF.

Un parámetro para evaluar la componente de SALS de la pérdida de cada modo guiado en la FMF se ha establecido como sigue (expresado en dB/km):

$$C_{el}\ (\text{modo i}) = 8 \times \pi \times \left(\frac{A_{\text{núcleo}}}{\lambda}\right) \times 10^3 \times C_0\ (\text{modo i})$$

$$\text{con } C_{el}\ (\text{modo i}) = \iint \frac{\left(n(r)^2 - n(r+dr)^2\right)^2}{n(r+dr)^4} \times E_i(r, \theta)^2\ r dr d\theta$$

siendo r la distancia radial desde el centro de la óptica y θ la componente azimutal en coordenadas polares y Ei(r, θ) la distribución de amplitud de campo de modo en el radio r y el ángulo θ del modo i

Diseñar un perfil de índice de refracción trapecial de este tipo con pérdidas adicionales inesperadas tales como C_{el} (modo i) ≤ 0,05 dB/km o incluso más, tales como C_{el} (modo i) ≤ 0,015 dB/km, permite satisfacer las necesidades específicas tanto de pérdida reducida como de las FMF de acoplamiento débil (como se muestra en la Tabla 2 a continuación).

Además, para limitar la no linealidad intramodo (y, de este modo, mantener unas buenas propiedades de guiado óptico dentro de la FMF), el perfil de índice de refracción de la FMF se diseña de tal modo que el área eficaz A_{efic} de cada modo guiado es mayor que 80 μm^2.

La **tabla 2** da las características $\Delta n_{efic\ mín}$, DMA y, para cada modo de LP guiado por la fibra, el coeficiente de pérdida adicional C_{el} inesperado, la pérdida total TL resultante de los mecanismos de pérdida por absorción y por difusión, la pérdida por flexión BL máxima (para un radio de 10 mm) y el área eficaz A_{efic}, con los perfiles de índice de los doce ejemplos de FMF de la Tabla 1.

Como se usa en el presente documento, el área eficaz de una fibra óptica es el área de la fibra óptica en la que se propaga la luz, y se determina en el modo especificado, a una longitud de onda de 1550 nm, salvo que se especifique lo contrario. El área eficaz $A_{efic\ \mu V}$ del modo $LP_{\mu V}$ se define como sigue:

- Si $\mu \neq 0$:

$$A_{efic_{\mu v}} = \frac{4\pi}{3} \frac{\left(\int_0^\infty |\psi_{\mu v}|^2 r dr\right)^2}{\int_0^\infty |\psi_{\mu v}|^4 r dr}$$

  en la que $\psi_{\mu V}$ es la distribución de amplitud de campo de modo del modo $LP_{\mu V}$ en el radio r, es decir, a la distancia polar r en las coordenadas polares de un punto en un sistema de ejes transversales a y centrados en relación con la fibra; y
- si μ = 0:

$$A_{efic_{0v}} = 2\pi \frac{\left(\int_0^\infty |\psi_{0v}|^2 rdr\right)^2}{\int_0^\infty |\psi_{0v}|^4 rdr}$$

La **Tabla 2** también proporciona una evaluación de las pérdidas por flexión por vuelta de un radio de flexión de 10 mm para cada modo de LP. Los datos de pérdida por flexión ilustrados en la **Tabla 2** se recogen de acuerdo con mediciones que cumplen con los requisitos de la norma 60793-1-47 de IEC (ed. 2.0). Para caracterizar apropiadamente las pérdidas por macroflexión del modo de LP_{01}, se puede empalmar una porción de dos metros de SMF en el lado de inyección de una FMF sometida a prueba para separar por filtrado los modos de orden alto. Para los modos de orden alto, es necesario usar convertidores de modo en la entrada y en la salida de la FMF para evaluar correctamente la potencia en los modos deseados. Aunque la caracterización de las FMF aún no está normalizada, la pérdida del modo de LP_{01} se puede medir de acuerdo con la norma 60793-1-40 de IEC (ed. 1.0) (el procedimiento A).

Sin embargo, para caracterizar apropiadamente las pérdidas del modo fundamental, se puede empalmar una porción de dos metros de SMF en el lado de inyección de una FMF sometida a prueba para separar por filtrado los modos de orden alto. Para los modos de orden alto, es necesario usar convertidores de modo en la entrada y en la salida de la FMF para evaluar correctamente la potencia en los modos deseados.

Tabla 2

Ejemplos	$\Delta n_{efic\ mín}$ (10-3)	DMA (dB/km)	modos de LP	Δn_{efic} (10^{-3})	A_{efic} (µm)	C_{el} (dB/km)	TL (dB/km)	BL (dB/vuelta)
Ejemplo 1	1,0	0,015	LP01	11,2	101	0,000	0,229	< 0,001
			LP11	8,4	97	0,001	0,228	< 0,001
			LP21	5,0	110	0,001	0,226	< 0,001
			LP02	4,0	105	0,001	0,226	< 0,001
			LP31	1,0	133	0,002	0,214	< 50
Ejemplo 2	1,2	0,010 -	LP01	14,0	97	0,002	0,245	< 0,001
			LP11	11,1	91	0,003	0,245	< 0,001
			LP21	7,4	103	0,004	0,243	< 0,001
			LP02	6,2	101	0,006	0,243	< 0,001
			LP31	3,1	118	0,006	0,239	< 0,001
			LP12	1,8	136	0,005	0,235	< 10
Ejemplo 3	1,3	0,002	LP01	13,9	128	0,002	0,242	< 0,001
			LP11	11,7	111	0,003	0,244	< 0,001
			LP21	8,7	119	0,005	0,245	< 0,001
			LP02	7,4	109	0,007	0,243	< 0,001
			LP31	5,1	125	0,008	0,245	< 0,001
			LP12	3,4	119	0,009	0,244	< 0,01
			LP41	1,1	137	0,010	0,242	< 1
Ejemplo 4	1,3	0,012	LP01	12,7	136	0,003	0,237	< 0,001
			LP11	10,6	114	0,005	0,241	< 0,001
			LP21	7,8	121	0,006	0,241	< 0,001
			LP02	6,5	99	0,004	0,235	< 0,001
			LP31	4,3	132	0,007	0,238	< 0,001
			LP12	2,3	139	0,005	0,229	< 10
Ejemplo 5	1,4	0,011 - -	LP01	13,8	100	0,003	0,244	< 0,001
			LP11	11,1	91	0,003	0,245	< 0,001
			LP21	7,4	103	0,004	0,243	< 0,001
			LP02	6,0	102	0,006	0,241	< 0,001
			LP31	3,1	118	0,006	0,238	< 0,001
			LP12	1,7	139	0,005	0,234	< 10

(continuación)

Ejemplos	$\Delta n_{efic\ mín}$ (10-3)	DMA (dB/km)	modos de LP	Δn_{efic} (10^{-3})	A_{efic} (μm)	C_{el} (dB/km)	TL (dB/km)	BL (dB/vuelta)
Ejemplo 6	1,6	0,014 -	LP01	13,3	123	0,003	0,241	< 0,001
			LP11	11,1	101	0,005	0,245	< 0,001
			LP21	7,9	110	0,006	0,244	< 0,001
			LP02	6,3	93	0,004	0,237	< 0,001
			LP31	4,0	123	0,006	0,240	< 0,001
			LP12	2,0	142	0,006	0,231	< 10
Ejemplo 7	1,6	0,012	LP01	13,0	135	0,003	0,239	< 0,001
			LP11	11,0	109	0,004	0,243	< 0,001
			LP21	8,1	119	0,005	0,242	< 0,001
			LP02	6,5	100	0,004	0,235	< 0,001
			LP31	4,5	131	0,006	0,239	< 0,001
			LP12	2,5	145	0,006	0,231	< 1
Ejemplo 8	1,5	0,004	LP01	14,2	132	0,003	0,244	< 0,001
			LP11	12,1	110	0,004	0,247	< 0,001
			LP21	9,2	118	0,006	0,248	< 0,001
			LP02	7,7	107	0,008	0,244	< 0,001
			LP31	5,6	123	0,008	0,248	< 0,001
			LP12	3,6	118	0,010	0,247	< 0,001
			LP41	1,5	134	0,011	0,246	< 1
Ejemplo 9	1,6	0,006	LP01	13,6	156	0,003	0,241	< 0,001
			LP11	11,9	122	0,004	0,244	< 0,001
			LP21	9,2	128	0,005	0,245	< 0,001
			LP02	7,6	107	0,007	0,239	< 0,001
			LP31	6,0	133	0,007	0,245	< 0,001
			LP12	3,9	128	0,010	0,242	< 0,001
			LP41	2,2	142	0,010	0,244	< 0,1
Ejemplo 10	1,6	0,003	LP01	13,4	149	0,006	0,243	< 0,001
			LP11	11,5	121	0,004	0,242	< 0,001
			LP21	8,8	129	0,005	0,242	< 0,001
			LP02	7,2	126	0,015	0,244	< 0,001
			LP31	5,5	133	0,007	0,243	< 0,001
			LP12	3,8	123	0,011	0,245	< 0,01
			LP41	1,8	142	0,010	0,242	< 10
Ejemplo 11	1,3	0,074	LP01	12,4	163	0,006	0,238	< 0,001
			LP11	10,8	120	0,006	0,242	< 0,001
			LP21	8,2	127	0,006	0,241	< 0,001
			LP02	6,2	103	0,005	0,229	< 0,001
			LP31	4,9	138	0,006	0,238	< 0,001
			LP12	2,6	154	0,008	0,229	< 10
			LP41	1,2	156	0,007	0,233	< 10
Ejemplo 12	1,6	0,005	LP01	13,0	135	0,003	0,168	< 0,001
			LP11	11,0	109	0,004	0,168	< 0,001
			LP21	8,1	119	0,005	0,169	< 0,001
			LP02	6,5	100	0,004	0,170	< 0,001
			LP31	4,5	131	0,006	0,171	< 0,001
			LP12	2,5	145	0,006	0,173	< 1

Como se muestra en el presente documento, gracias a los parámetros de perfil elegidos de acuerdo con la invención de los presentes inventores (recopilados en la Tabla 1), cada FMF sometida a prueba es capaz de guiar al menos cinco modos de LP, con $\Delta n_{efic\ mín} \geq 0{,}9 \times 10^{-3}$, $C_{el} \leq 0{,}015$ dB/km y DMA ≤ 0,02 dB/km.

Todos los ejemplos en las Tablas 1 y 2 cumplen con los requisitos estructurales de:

- la integral de superficie $A_{núcleo}$ está entre 180 × 10^{-3} y 270 × 10^{-3} µm;
- el radio R2 está entre 6,8 y 11,5 µm;
- la diferencia de índice de refracción Δn1 está entre 13 × 10^{-3} y 18 × 10^{-3};
- la pendiente de transición S está entre 1,7 × 10^{-3} y 12 × 10^{-3} μm^{-1}.

En una realización preferida adicional, el valor del radio R3 de la porción intermedia del revestimiento es de tal modo que R3 ≥ 1,8 × R2.

De acuerdo con una característica particular, el índice de refracción del revestimiento exterior (n_{Cl}) se elige para que sea cercano al índice de refracción de la sílice. En otra realización ilustrativa, el índice de refracción del revestimiento exterior (n_{Cl}) se puede elegir entre 1,437 y 1,458 o, como alternativa, el índice de refracción del núcleo óptico se elige para que sea cercano al índice de la sílice para reducir las pérdidas totales de la FMF. De tal modo que el índice de refracción de revestimiento (n_{Cl}) se puede dopar hacia abajo hasta -20 × 10^{-3} con respecto al índice de refracción de sílice para proporcionar unas FMF de pérdida ultrabaja reduciendo su contribución por efecto Rayleigh (gracias a una estructura de núcleo de sílice pura o de bajo contenido en Ge).

A continuación se hace referencia a la Tabla 3, que da los parámetros de los perfiles de índice de seis ejemplos comparativos (del Ejemplo Comparativo 1 al Ejemplo Comparativo 6) de fibras ópticas fuera del ámbito de la presente invención, es decir, que no satisfacen los criterios de la presente invención.

Tabla 3

Ejemplos	R1 (µm)	R2 (µm)	R3 (µm)	Δn0 (10-3)	Δn1 (10-3)	Δn2 (10^{-3})	$A_{núcleo}$ (10^{-3} µm)	A_0 / A_{trampa}	S (10^{-3}/µm)	r
Ejemplo Comparativo 1	5,06	11,50	19,75	-	15,7	-0,2	263	0,000	2,5	0,44
Ejemplo Comparativo 2	7,29	8,28	19,75	-	16,7	-0,2	262	0,000	17,0	0,88
Ejemplo Comparativo 3	8,28	8,28	19,75	-	15,7	-0,2	263	0,000	∞	1,00
Ejemplo Comparativo 4	8,01	8,01	19,75	14,7	16,7	-0,2	260	0,041	∞	1,00
Ejemplo Comparativo 5	2,51	11,64	19,75	11,5	13,5	-0,2	190	0,020	1,5	0,22
Ejemplo Comparativo 6	5,73	10,82	19,75	10,7	15,7	-0,2	228	0,131	3,1	0,53

Al igual que para la Tabla 2, la **Tabla 4** da las características $\Delta n_{efic\ mín}$, DMA y, para cada modo de LP guiado por la fibra, el coeficiente de pérdida adicional C_{el} inesperado, la pérdida total TL resultante de los mecanismos de pérdida por absorción y por difusión, la pérdida por flexión BL máxima (para un radio de 10 mm) y el área eficaz A_{efic}, con los perfiles de índice de los seis ejemplos de fibras ópticas de la Tabla 3 anterior.

Tabla 4

Ejemplos	$\Delta n_{efic\ mín}$ (10^{-3})	DMA (dB/km)	modos de LP	Δn_{efic} (10^{-3})	A_{efic} (µm)	C_{el} (dB/km)	TL (dB/km)	BL (dB/vuelta)
Ejemplo Comparativo 1	0,8	0,008	LP01	13,4	112	0,001	0,240	< 0,001
			LP11	11,0	112	0,002	0,239	< 0,001
			LP21	7,9	129	0,004	0,238	< 0,001
			LP02	7,2	123	0,004	0,239	< 0,001
			LP31	4,5	146	0,005	0,233	< 0,001
			LP12	3,4	153	0,004	0,232	< 0,1

(continuación)

Ejemplos	$\Delta n_{efic\ mín}$ (10^{-3})	DMA (dB/km)	modos de LP	Δn_{efic} (10^{-3})	A_{efic} (µm)	C_{el} (dB/km)	TL (dB/km)	BL (dB/vuelta)
Ejemplo Comparativo 2	1,0	0,015	LP01	14,5	120	0,003	0,246	< 0,001
			LP11	12,2	111	0,007	0,250	< 0,001
			LP21	9,2	116	0,012	0,254	< 0,001
			LP02	8,2	100	0,013	0,256	< 0,001
			LP31	5,6	119	0,017	0,259	< 0,001
			LP12	3,7	107	0,019	0,259	< 0,01
			LP41	1,5	126	0,023	0,262	< 10
Ejemplo Comparativo 3	1,0	0,069	LP01	14,6	125	0,009	0,253	< 0,001
			LP11	12,4	115	0,023	0,266	< 0,001
			LP21	9,5	120	0,040	0,283	< 0,001
			LP02	8,6	103	0,045	0,288	< 0,001
			LP31	6,0	123	0,059	0,302	< 0,001
			LP12	4,2	109	0,066	0,309	< 0,01
			LP41	2,0	129	0,080	0,321	< 10
Ejemplo Comparativo 4	1,7	0,076	LP01	14,2	149	0,015	0,256	< 0,001
			LP11	12,3	117	0,028	0,271	< 0,001
			LP21	9,6	121	0,046	0,289	< 0,001
			LP02	7,9	101	0,054	0,289	< 0,001
			LP31	6,1	123	0,068	0,310	< 0,001
			LP12	3,9	115	0,080	0,317	< 0,001
			LP41	2,2	129	0,092	0,331	< 0,01
Ejemplo Comparativo 5	0,4	0,013	LP01	10,3	86	0,002	0,228	< 0,001
			LP11	7,1	99	0,002	0,223	< 0,001
			LP21	3,6	137	0,002	0,215	< 0,01
			LP02	3,3	171	0,002	0,216	< 1
Ejemplo Comparativo 6	0,5	0,022	LP01	11,9	174	0,012	0,244	< 0,001
			LP11	10,5	119	0,010	0,246	< 0,001
			LP21	8,0	127	0,008	0,243	< 0,001
			LP02	5,2	113	0,008	0,223	< 0,001
			LP31	4,8	139	0,007	0,238	< 0,001
			LP12	2,2	175	0,012	0,228	< 50
			LP41	1,1	160	0,006	0,231	< 10

El Ejemplo Comparativo 1 es un ejemplo de una fibra óptica que tiene un perfil de núcleo de forma trapecial (A_0 / A_{trampa} = 0) caracterizado por una pendiente S que no satisface el 'Criterio 1'. Como consecuencia, $\Delta n_{efic\ mín}$ entremedias de los modos de LP21 y de LP02 es demasiado pequeño.

El Ejemplo Comparativo 2 es un ejemplo de una fibra óptica que tiene un perfil de núcleo de forma trapecial con centro hundido caracterizado por una pendiente S que es demasiado grande. Como consecuencia, la transición núcleo-revestimiento es demasiado abrupta para los modos de orden más alto y el coeficiente de pérdida adicional C_{el} inesperado de LP12 y LP41 no es deseable (C_{el} > 0,015 dB/km).

El Ejemplo Comparativo 3 es un ejemplo de una fibra óptica que tiene un perfil de índice escalonado. El coeficiente de pérdida adicional C_{el} inesperado para los modos LP21, LP02, LP31, LP12 y LP41 no es deseable debido a que es superior a 0,02 dB/km. En consecuencia, la DMA es demasiado alta (DMA > 0,05 dB/km) para satisfacer las demandas de capacidad de comunicación de fibra.

El Ejemplo Comparativo 4 es un ejemplo de una fibra óptica que tiene un perfil de índice escalonado con una parte central hundida que permite obtener una diferencia de índice eficaz entre modos mínima mejorada y suficientemente alta en comparación con el Ejemplo Comparativo 3 ($\Delta n_{efic\ mín} > 1,5 \times 10^{-3}$) pero con unas pérdidas adicionales inesperadas demasiado altas (C_{el} > 0,02 dB/km). En consecuencia, la DMA es demasiado alta (DMA > 0,05 dB/km) para satisfacer las demandas de capacidad de comunicación de fibra.

El Ejemplo Comparativo 5 es un ejemplo de una fibra óptica que tiene un perfil de forma de núcleo trapecial con centro

hundido caracterizado por una pendiente S que es demasiado pequeña y no satisface el 'Criterio 1'. Como consecuencia, solo cuatro modos de LP se guían y $\Delta n_{efic\ mín}$ entremedias de los modos de LP21 y de LP02 es demasiado pequeño.

El Ejemplo Comparativo 6 es un ejemplo de una fibra óptica que tiene un perfil de forma de núcleo trapecial con centro hundido caracterizado por una pendiente Se que no satisface el 'Criterio 1' y una relación A_0 / A_{trampa} superior a 0,1. Como consecuencia, $\Delta n_{efic\ mín}$ entremedias de los modos de LP02 y de LP31 es demasiado pequeño.

REIVINDICACIONES

1. Fibra óptica que comprende un núcleo óptico rodeado por un revestimiento óptico, en la que el revestimiento óptico está formado por un revestimiento óptico intermedio interior adyacente al núcleo óptico y por un revestimiento óptico exterior,
en la que el núcleo óptico tiene un perfil de índice de refracción Δn(r) de una forma similar a un trapecio, como una función de una distancia radial r desde el centro del núcleo óptico, teniendo el núcleo óptico una parte central de radio R1, y una parte de transición varia desde el radio R1 hasta un radio R2, de tal modo que R2 > R1, definiéndose dicho perfil de índice de refracción mediante:

- una integral de superficie $A_{núcleo}$ definida como sigue: $A_{\text{núcleo}} = 2\int_0^{R2} \Delta n(r).\, dr$
- una pendiente de transición S definida como sigue: $S = \left|\frac{\Delta n2 - \Delta n1}{R2 - R1}\right|$

con:

Δn1, la diferencia de índice de refracción de la parte central del núcleo óptico con respecto al revestimiento óptico exterior;
Δn2, la diferencia de índice de refracción de una parte de revestimiento, adyacente al núcleo óptico, con respecto al revestimiento óptico exterior;

y en la que:

- la integral de superficie $A_{núcleo}$ está entre 180 × 10^{-3} y 270 × 10^{-3} µm;
- el radio R2 está entre 6,8 y 11,5 µm;
- la pendiente de transición S está entre 1,7 × 10^{-3} y 12 × 10^{-3} μm^{-1};
- la parte central del núcleo óptico comprende una región de índice de refracción hundido, denominada núcleo hundido interior, que va desde el centro del núcleo óptico hasta el radio R0 y que tiene una diferencia de índice de refracción con respecto al revestimiento óptico exterior Δn0, de modo que Δn1 > Δn0 ≥ (Δn1 - 6 × 10^{-3}), teniendo dicho núcleo hundido interior una integral de superficie A_0 y suponiendo una integral de superficie A_{trampa} como la integral de superficie del perfil de índice de refracción del núcleo sin hundir, definiéndose dichas integrales de superficie A_0 y A_{trampa} como sigue:

$$A_0 = 2\int_0^{R0} (\Delta n1 - \Delta n(r))dr$$

$$A_{\text{trampa}} = 2\left(\Delta n1 \cdot R1 + \int_{R1}^{R2} \Delta n(r)dr\right)$$

con una relación A_0 / A_{trampa} inferior o igual a 0,1.

2. Fibra óptica de acuerdo con la reivindicación 1, en la que la diferencia de índice de refracción Δn1 está entre 13 × 10^{-3} y 18 × 10^{-3}.

3. Fibra óptica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 y 2, en la que una relación R1 / R2 está entre 0,30 y 0,85.

4. Fibra óptica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en la que la diferencia de índice de refracción Δn2 está entre -1 × 10^{-3} y 1 × 10^{-3} y, más particularmente, entre -0,5 × 10^{-3} y 0,5 × 10^{-3}.

5. Fibra óptica de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en la que la pendiente de transición S satisface la siguiente desigualdad:

$$S \geq J\left(\frac{A_0}{A_{\text{trampa}}}\right)^2 + K\left(\frac{A_0}{A_{\text{trampa}}}\right) + L$$

con J = 650 × 10^{-3} μm^{-1}, K = -78 × 10^{-3} μm^{-1} y L = 4,0 × 10^{-3} μm^{-1}.

6. Fibra óptica de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en la que la pendiente de transición S satisface la siguiente desigualdad:

$$S \geq J\left(\frac{A_0}{A_{\text{trampa}}}\right)^2 + K\left(\frac{A_0}{A_{\text{trampa}}}\right) + L$$

con J = 1900 × 10^{-3} μm^{-1}, K = -209 × 10^{-3} μm^{-1} y L = 7,6 × 10^{-3} μm^{-1}.

7. Fibra óptica de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en la que la pendiente de transición S satisface la siguiente desigualdad:

$$S \geq J\left(\frac{A_0}{A_{trampa}}\right)^2 + K\left(\frac{A_0}{A_{trampa}}\right) + L$$

con J = 5800 × 10^{-3} μm^{-1}, K = -580 × 10^{-3} μm^{-1} y L = 17 × 10^{-3} μm^{-1}.

8. Fibra óptica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en la que cada modo de polarización lineal guiado por dicha fibra óptica tiene un área eficaz A_{efic}, de modo que A_{efic} > 80 μm^2.

9. Fibra óptica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en la que se guían al menos cinco modos de polarización lineal.

10. Fibra óptica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, en la que una atenuación de modo diferencial, DMA, para todos los modos guiados por dicha fibra óptica, es de modo que: DMA ≤ 0,050 dB/km y, más particularmente, DMA ≤ 0,020 dB/km.

11. Fibra óptica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, en la que la parte de transición del perfil de índice de refracción de núcleo similar a un trapecio comprende al menos un material dopante de una concentración que cambia gradualmente como una función de la distancia radial r desde una concentración en la parte central del núcleo óptico a una concentración en dicha parte de revestimiento adyacente al núcleo óptico.

12. Fibra óptica de acuerdo con la reivindicación 11, en la que dicho al menos un material dopante pertenece al grupo que comprende: óxido de germanio, óxido de fósforo, óxido de boro, flúor.

13. Fibra óptica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12, en la que el revestimiento óptico exterior tiene un índice de refracción entre 1,437 y 1,458.

14. Sistema de transmisión óptica que comprende al menos una fibra óptica de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13.

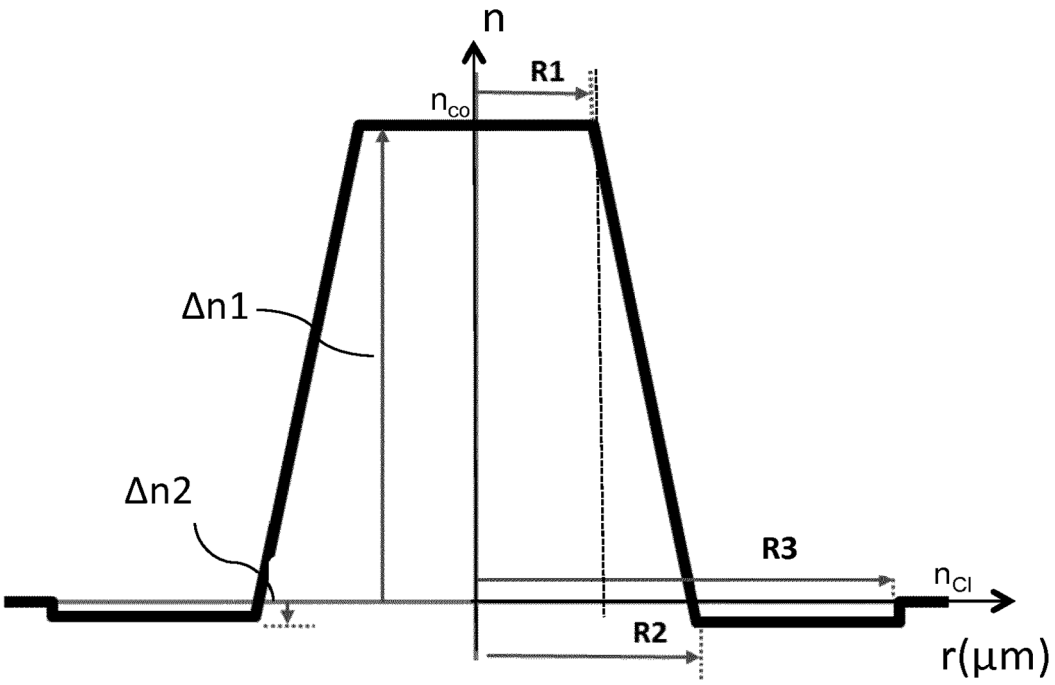


Figura 1

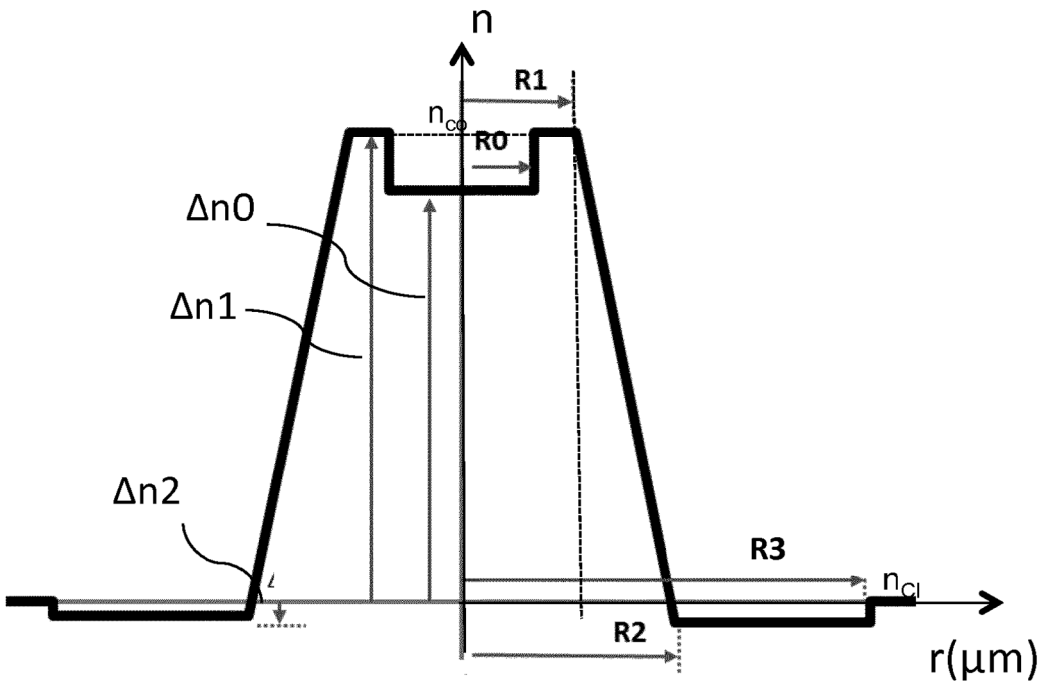


Figura 2

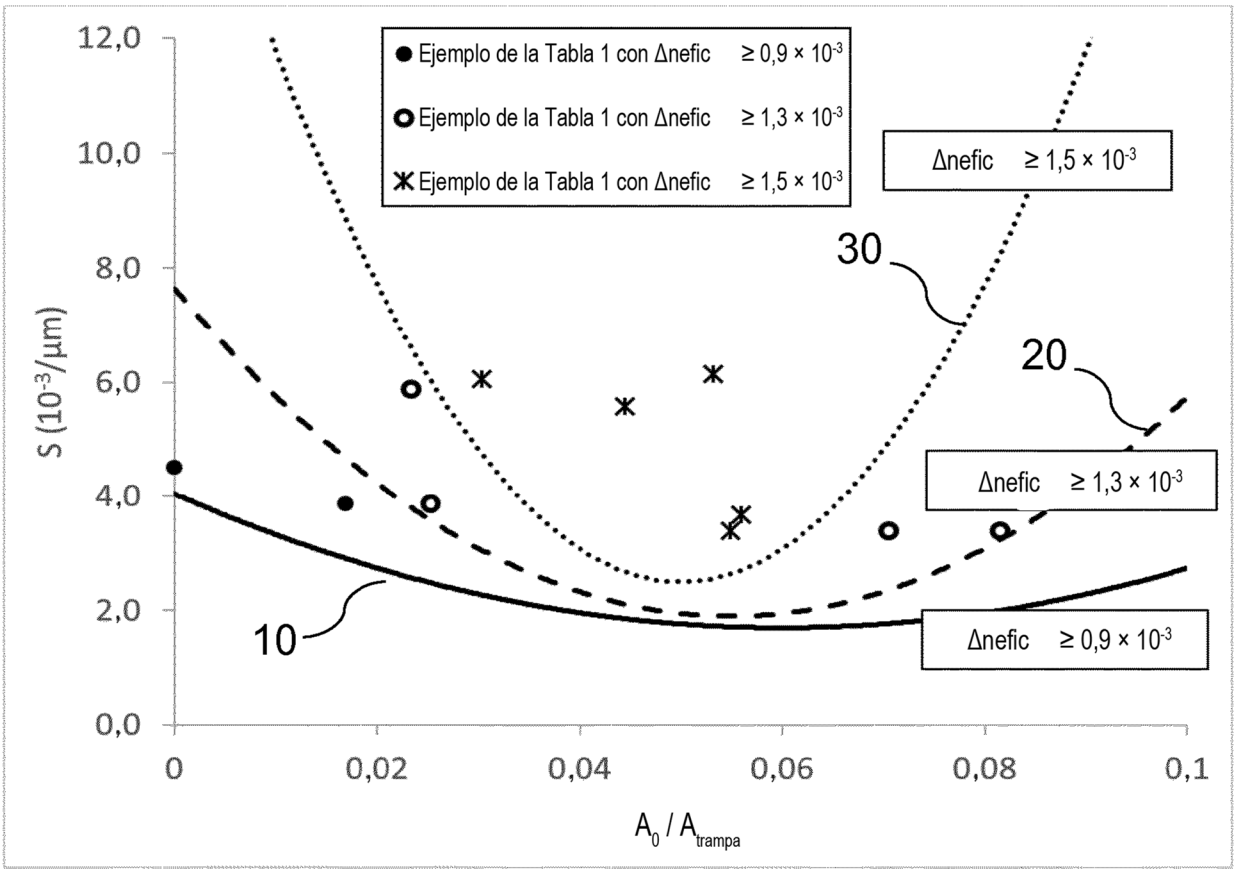

12,0
10,0
8,0
6,0
4,0
2,0
0,0
S (10-3/µm)
0
0,02
0,04
0,06
0,08
0,1
A0 / Atrampa
Ejemplo de la Tabla 1 con Δnefic ≥ 0,9 × 10-3
Ejemplo de la Tabla 1 con Δnefic ≥ 1,3 × 10-3
Ejemplo de la Tabla 1 con Δnefic ≥ 1,5 × 10-3
Δnefic ≥ 1,5 × 10-3
Δnefic ≥ 1,3 × 10-3
Δnefic ≥ 0,9 × 10-3
30
20
10

Figura 3

REFERENCIAS CITADAS EN LA DESCRIPCIÓN

La lista de referencias citada por el solicitante lo es solamente para utilidad del lector, no formando parte de los documentos de patente europeos. Aún cuando las referencias han sido cuidadosamente recopiladas, no pueden excluirse errores u omisiones y la OEP rechaza toda responsabilidad a este respecto.

Documentos de patente citado en la descripción

- WO 2011094400 A **[0006]**
- US 20160306108 A **[0015]**

Bibliografía no de patentes citada en la descripción

- **BIGOT et al.** *Next-Generation Multimode Fibers for Space Division Multiplexing,* 24 July 2017 **[0013]**