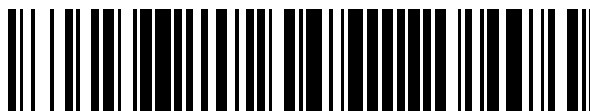


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 649 837**

51 Int. Cl.:

H01S 3/067 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **27.03.2009 PCT/EP2009/053648**

87 Fecha y número de publicación internacional: **01.10.2009 WO09118404**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.03.2009 E 09724063 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.09.2017 EP 2260549**

54 Título: **Sistema de fibra láser de alta potencia**

30 Prioridad:

28.03.2008 FR 0801714

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

15.01.2018

73 Titular/es:

**THALES (100.0%)
Tour Carpe Diem, Place des Corolles, Esplanade
Nord
00 Courbevoie, FR**

72 Inventor/es:

**POCHOLLE, JEAN-PAUL y
DOITTAU, FRANÇOIS-XAVIER**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 649 837 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

Sistema de fibra láser de alta potencia

5 El campo de la invención es el de las fuentes láser de alta potencia de la clase 100 W a algunos kW, incluso la decena de kW y más precisamente el de las fuentes láser con fibra que operan en modo continuo o casi continuo destinadas, en concreto, a iluminar un objetivo.

Para realizar unos sistemas de este tipo se busca generalmente utilizar unas fibras unimodales de escasa diferencia de índice que permitan obtener una propagación monomodo con un gran radio de núcleo.

10 En efecto, cualquier fuente óptica que deba implementarse para el depósito de potencia (o de energía) a distancia debe presentar la luminancia más elevada, con el fin de tener las iluminaciones más fuertes (o fluencia) sobre un objetivo.

Las fibras láser son hoy en día las fuentes que permiten obtener las luminancias más importantes. La luminancia de una fuente se expresa según la ley:

$$Lum (W / m^2.sr) = \frac{P_L(W)}{S(m^2)\Omega(sr)}$$

15 P_L es la potencia óptica suministrada por la fuente, S es la superficie transmisiva y ω representa el ángulo sólido de radiación. El producto $S\omega$ se denomina la extensión geométrica que es una invariante de óptica.

Para una fibra óptica que opera en régimen unimodal (o monomodo) la condición sobre el radio de núcleo a y sobre

$$\Delta \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

la diferencia de índice relativa n_1 (n_1 corresponde al índice de refracción del material de núcleo y n_2 al que caracteriza a la funda óptica) se representa por la siguiente ecuación como se formula en la publicación "Weakly guiding fibers" D.Gloge Appl.Opt.10 (10), oct.1971 p.2.252:

$$V = ka\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx kan_1\sqrt{2\Delta} \leq 2,4048$$

20 donde V es un parámetro denominado frecuencia normalizada y $k = 2\pi/\lambda$ con λ la longitud de onda. Esta condición es aplicable para una fibra denominada de escalón de índice. La figura 1 ilustra los diferentes parámetros optogeométricos característicos de una fibra óptica estándar.

25 Con el fin de reducir la manifestación de efectos no lineales se debe favorecer el empleo de estructuras de guiado caracterizadas por una superficie de modo lo más importante posible.

30 Para esto, conviene resolver la siguiente problemática: una gran dimensión de modo necesita la realización de una fibra de muy escasa diferencia de índice. Esto conlleva una propagación de muy escaso guiado, lo que hace la manipulación de la fibra muy crítica, ya que es muy sensible a cualquier curvatura o microcurvatura. De manera inversa, la realización de una fibra de fuerte diferencia de índice implica un escaso radio de núcleo, lo que no es satisfactorio con respecto a los efectos no lineales que pueden desarrollarse.

En este contexto, la presente invención propone un sistema de fibra láser de alta potencia que incluye al menos una fibra cuyas propiedades ópticas están optimizadas gracias a unas propiedades optogeométricas particulares.

35 Más precisamente, la invención tiene como objeto un sistema de fibra láser según la reivindicación 1 que incluye al menos una fibra láser monomodo, que transmite a una longitud de onda señal (λ), incluyendo dicha fibra al menos una funda exterior y un núcleo, presentando dicha fibra en su núcleo un gradiente de índice radial caracterizado porque siendo el sistema un láser de potencia, dicha fibra incluye al menos sobre una parte de su longitud, un tramo de geometría que presenta un radio de núcleo de fibra de gradiente decreciente entre un extremo denominado de entrada del tramo y un extremo denominado de salida del tramo. Xie Ween et al "Single mode parabolic gain guiding optical fiber with core diameter up to 200 μ m" International Journal of Infrared and Millimeter Waves, vol. 29, 28-2-2008, describe un sistema de fibra láser que incluye al menos una fibra monomodo, incluyendo dicha fibra al menos una funda exterior y un núcleo con un gradiente de índice radial.

40 US5333218 A describe un sistema de fibra láser que incluye al menos una fibra monomodo, incluyendo dicha fibra al menos una funda exterior y un núcleo con una parte afilada. Según una variante de la invención, el gradiente de índice es de tipo parabólico.

45 Según una variante de la invención, el gradiente de índice es de tipo triangular.

Según una variante de la invención, la fibra incluye un tramo de geometría cónica, un primer radio de funda r_1 y un segundo radio de núcleo r_2 , estando los primero y segundo radios definidos respectivamente por las siguientes

ecuaciones:

$$r_1(z) = r_{1c}(1 - m_1 z)$$

$$r_2(z) = r_{2c}(1 - m_2 z)$$

- 5 Según la invención, el sistema comprende varias fibras monomodos, repartidas de manera que se cree un acoplamiento modal entre dichas fibras, siendo una de las fibras una fibra emergente para la longitud de onda señal del haz láser de transmisión
- Según una variante de la invención, las fibras están repartidas según una geometría matricial en un plano perpendicular a la longitud de dichas fibras.
- Según una variante de la invención, las fibras están repartidas de manera circular alrededor de una fibra central.
- 10 Según una variante de la invención, el sistema comprende una preforma que incluye un conjunto de barrotos que constituyen las fundas y los núcleos de fibras individuales después de fibrado.
- Según una variante de la invención, el sistema láser comprende:
- una fibra cebo destinada a recibir una potencia de bomba procedente de diodos láser;
 - un conjunto de fibras acopladas radialmente y estirada con el fin de optimizar el acoplamiento;
- 15 - una fibra central por la que emerge la longitud de onda señal del haz láser.
- Según una variante de la invención, la fibra emergente incluye una función espejo, este espejo puede ser ventajosamente de tipo reflector de Bragg (por fotoinscripción).
- Según una variante de la invención, el sistema comprende unos medios de tipo axicon acoplados a los extremos de las fibras opuestos a los que incluyen los tramos cónicos de manera que se realice una operación de multiplexación sobre unos estados de polarización diferentes de una onda señal.
- 20 Según una variante de la invención, el sistema incluye al menos una fibra que presenta una funda de sílice.
- Según una variante de la invención, el sistema incluye al menos una fibra que presenta un núcleo que incluye sílice dopada por un óxido tal como GeO_2 .
- Según una variante de la invención, el núcleo de fibra comprende unas capas periféricas de tasas variables de GeO_2 de manera que se asegure un gradiente de índice radial en el interior del núcleo.
- 25 Según una variante de la invención, el sistema incluye al menos una fibra que presenta un núcleo que incluye sílice dopada con unos iones de tipo tierra rara para asegurar los efectos láser.
- La invención se comprenderá mejor y otras ventajas se mostrarán con la lectura de la descripción que va a seguir dada a título no limitativo y gracias a las figuras adjuntas entre las que:
- 30 - la figura 1 ilustra los diferentes parámetros optogeométricos característicos de una fibra óptica;
- la figura 2 esquematiza una fibra láser de potencia, utilizada en un sistema láser según la invención
- la figura 3a ilustra la evolución del radio del modo HE_{11} en función de la distancia en una estructura de fibra afilada;
- 35 - la figura 3b ilustra la distribución de la iluminación en función de la distancia radial y de la distancia de propagación en la fibra afilada;
- la figura 3c ilustra la iluminación de $z = 1$ m para una fibra que presenta una conicidad de un 50 % a partir de un diámetro inicial de $100 \mu\text{m}$;
- la figura 4 ilustra la distribución de la iluminación en función de la distancia para tres fibras de diámetro inicial de $100 \mu\text{m}$ y que incluye unos tramos afilados con una conicidad de un 50 % sobre 1 m;
- 40 - la figura 5 ilustra un trazado de la evolución del radio del modo normalizado al radio de núcleo de una fibra en función del parámetro frecuencia normalizada y en función del gradiente de índice;
- la figura 6 ilustra un trazado de la evolución del radio del modo HE_{11} en función de la estructura en una fibra afilada de perfil parabólico;
- 45 - la figura 7 ilustra un trazado de la evolución de la iluminación en función de la distancia en la parte cónica para una fibra de perfil de índice;
- la figura 8 ilustra un trazado la evolución de la iluminación $|a_1(z)|^2$ a una longitud de onda dada;
- la figura 9 ilustra un acoplador lineal de dos fibras;
- la figura 10 ilustra la evolución del coeficiente de acoplamiento entre las dos fibras y esto en función de la separación normalizada entre las dos guías sobre el campo espectral ocupado por la señal (láser);
- 50 - las figuras 11a, 11b y 11c ilustran el comportamiento del acoplador de fibra en función de la longitud de onda, de la distancia de propagación y del espaciamiento normalizado entre los dos núcleos de las fibras ópticas;
- la figura 12a representa la evolución del coeficiente de acoplamiento local en función de la distancia z ;
- la figura 12b ilustra el factor de acoplamiento efectivo $C_{e/z}$ con la distancia z en la parte afilada;

- la figura 12c ilustra la distribución de iluminación normalizada de la guía excitada en una configuración de acoplador lineal de estructura cónica de 1,07 μm (curva 12c₀) y de 1,09 μm (curva 12c₁) en función de la distancia de propagación.
- 5 - la figura 13a ilustra una variante de la invención en la que, las fibras láser están ensambladas según una simetría cuadrada;
- las figuras 13b y 13c ilustran los fenómenos de acoplamiento entre guías en función de la distancia de propagación y de la longitud de onda;
- la figura 13d ilustra la distribución de la iluminación en la guía 1 en función de z y para diferentes longitudes de onda;
- 10 - la figura 14a ilustra una geometría de apilamiento de fibras simétrico de configuración cilíndrica;
- la figura 14b ilustra la evolución de la iluminación de la fibra central, así como la obtenida sobre una de las fibras de acoplamiento periférico en función de la distancia de propagación con s = 5 y de 1,07 μm y la figura 14c ilustra una visión de la distribución espectral a la salida de fibras (central y en periferia);
- la figura 15a ilustra una vista en perspectiva de una red de fibras repartidas de manera cilíndrica utilizada en una variante de la invención;
- 15 - la figura 15b ilustra una vista en corte de otra variante de la invención, en la que una preforma incluye un conjunto de fundas y de núcleos de fibra individuales;
- la figura 16a ilustra una vista en corte de una variante de sistema láser según la invención;
- la figura 16b ilustra otra variante de la invención que incluye una óptica de tipo axicon;
- 20 - la figura 17 ilustra la evolución del índice de refracción de la sílice dopada de GeO₂;
- la figura 18 ilustra una etapa de realización de fibra utilizada en la invención.

El núcleo de la invención reside en el uso de fibra cuyo núcleo presenta un perfil de índice radial para realizar un sistema de fibra láser de potencia. Este perfil puede ser, en concreto, de tipo parabólico o triangular, las prestaciones obtenidas con este tipo de configuración se detallarán en la descripción a continuación.

- 25 Por otra parte, puede ser particularmente interesante combinar un perfil de índice radial de este tipo con un gradiente longitudinal de núcleo de fibra.

La figura 2 esquematiza, de este modo, una fibra láser de potencia utilizada en un sistema láser según la invención. Esta fibra está destinada a estar alimentada por una potencia láser P_L, para a la salida de fibra generar un haz láser que transmite a una longitud de onda señal λ.

- 30 Esta fibra incluye un tramo T que presenta un extremo de entrada Exe y un extremo de salida Exs, un gradiente de radio de núcleo longitudinal y un perfil de índice radial.

El análisis de más abajo trata sobre las propiedades obtenidas con un gradiente decreciente de radio de núcleo de fibra de este tipo:

- 35 De manera conocida, aunque la solución de las ecuaciones de Maxwell aplicadas a una estructura de dos dieléctricos y de simetría cilíndrica desemboca en expresar la distribución radial del campo en forma de funciones de Bessel y de funciones de Bessel modificadas de primera especie, se puede hacer una aproximación de esta distribución del campo por una ley gaussiana con un radio de modo de 1/e (de campo y de 1/e² de iluminación) que toma la forma:

$$w_0(\lambda) = a \left(0,65 + \frac{1,619}{V^{3/2}(\lambda)} + \frac{2,879}{V^6(\lambda)} \right)$$

- 40 Esta ley establecida por D. Marcuse y descrita, en concreto, en el artículo "Loss analysis of single-mode fiber splices" Bell Syst.Tech. J., vol 56, n.º 5, 1977, p.703-719 es aplicable sobre el campo 0,8 < V < 2,8. Una variante permite conectar directamente la evolución del modo con la longitud de onda señal (el láser en el caso considerado) para una longitud de onda de corte λ_c dada.

- 45 Esta longitud de onda λ_c define el campo espectral a partir del que solo el grupo de modos HE₁₁ con sus dos estados propios de polarización (LP₀₁) puede propagarse sin pérdidas (en el sentido electromagnético). Para unas longitudes de onda señal más pequeñas, el grupo de modos LP₁₁ puede existir y propagarse con el grupo de modos LP₀₁ (régimen multimodal). Esta relación es la siguiente:

$$w_0(\lambda) \approx a \left(0,65 + 0,434 \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^{3/2} + 0,0149 \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^6 \right)$$

- 50 A modo de ejemplo, es posible evaluar la evolución del radio del modo a partir de los datos optogeométricos que caracterizan a una fibra óptica.

En presencia de un estiramiento lineal, la dimensión del modo aumenta en función de la relación λ/λ_c aunque el radio del núcleo disminuya.

De este modo, a título de ejemplo, se puede considerar una fibra láser que transmita una onda señal de $\lambda=1,07 \mu\text{m}$ y que presente un radio de núcleo y unas variaciones de índice $\Delta=10^{-3}$ tales que la longitud de onda de corte inicial sea igual a $\lambda_c=0,75 \mu\text{m}$. Esta longitud de onda de corte $\lambda_c=0,75 \mu\text{m}$ corresponde a un parámetro frecuencia normalizada $V=2,4048$ y un radio de modo $w_0(0,75 \mu\text{m})=4,85 \mu\text{m}$.

A la longitud de onda señal se tiene un parámetro V que vale $V=1,68$ y una dimensión de modo (radio) $w_0(1,07 \mu\text{m})=6,715 \mu\text{m}$.

Estos parámetros conducen a un modo HE_{11} escasamente confinado en la zona cubierta por el radio de núcleo de la fibra.

Tradicionalmente, la fibra presenta un diámetro de funda de $100 \mu\text{m}$. Debe señalarse que generalmente las fibras láser denominada de doble funda están caracterizadas por un diámetro de funda del orden de $400 \mu\text{m}$ con el fin de acoplar unos diodos de bombeo por medio de un conjunto de acopladores multimodos.

Según una primera variante propuesta en la invención, el gradiente de radio de núcleo de fibra puede ser un perfil cónico, es decir, que tradicionalmente, en presencia de un estiramiento sobre una distancia arbitraria de 1 m con el fin de obtener un acoplamiento adiabático con una conicidad de un 50% , lo que corresponde a un paso de un diámetro de funda inicial de $100 \mu\text{m}$ a $50 \mu\text{m}$, es posible describir la evolución de los diferentes radios (núcleo y funda) según la ley de homotecia:

$$\left. \begin{array}{l} b(z) \\ a(z) \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} b_c(1-0,5z) \\ a_c(1-0,5z) \end{array} \right.$$

La evolución del radio del modo en función de la distancia se representa entonces en la figura 3a, representando las rectas $3a_1$ y $3a_2$ respectivamente la evolución de los radios de núcleo y de funda en función de la distancia z .

En el extremo de la parte afilada, el parámetro frecuencia normalizada corresponde a $V=0,84$, valor cercano al asociado al límite de validez de la ley que define el modelo gaussiano de la distribución modal del modo HE_{11} o grupo de modos LP_{01} . Se desprende de las curvas ilustradas en la figura 3a que sobre una longitud de tramo de perfil cónico de $z \approx 1 \text{ m}$, el radio del modo de $1/e$ de campo es sustancialmente igual al radio de la funda. Más allá, el modo experimenta unos efectos de difracción y de refracción que se traducen en unas pérdidas de radiación.

Se sabe que el umbral de daño óptico de un medio dieléctrico (en cuanto a fluencia (J/m^2) o en cuanto a iluminación (W/m^2)) es siempre más escaso al nivel de la interfaz en comparación con el que caracteriza a la resistencia en volumen. La geometría cónica permite, de este modo, resolver en parte esta limitación. En particular, si se busca maximizar la potencia óptica que puede ser suministrada por un láser o un sistema amplificador de fibra óptica.

De este modo, deben cumplirse dos condiciones, que consisten en desarrollar unas fibras ópticas unimodales que deben presentar una escasa longitud de onda de corte para el grupo de modos LP_{11} , con respecto a la longitud de onda señal y una conicidad del extremo de cada fibra láser.

Entonces, es posible evaluar los efectos de un estiramiento sobre el campo, tomando en cuenta una iluminación proporcional al módulo del campo al cuadrado:

$$I(r, z) \propto |E|^2$$

Con el fin de dar cuenta de la extensión radial del modo, se evalúa la distribución de la iluminación. Para ello, se define la potencia vehiculada por el modo según la ley:

$$P_T = I_0(z) \int_0^{2\pi} \int_0^\infty e^{-2\left(\frac{r}{w_0(z)}\right)^2} r \, dr \, d\phi = I_0 \frac{\pi w_0^2(z)}{2}$$

y la distribución de la iluminación (W/m^2) pasa a ser:

$$I(r, z) = \frac{2P_T}{\pi w_0^2(z)} e^{-2\left(\frac{r}{w_0(z)}\right)^2}$$

La distribución de la iluminación en función de la distancia radial y de la distancia de propagación en la fibra afilada

se representa en la figura 3b, considerando una potencia óptica vehiculada de 1 W.

Colocándose a la distancia $z=1\text{ m}$, se observa que el reparto de la potencia no está contenido en el diámetro de funda (50 μm en el caso evaluado).

La figura 3c da la distribución de iluminación en esta cota y para la conicidad propuesta.

- 5 Un cálculo elemental da el porcentaje de potencia contenido en una abertura circular centrada de radio b:

$$\eta_g = \frac{\int_0^b e^{-2\left(\frac{r}{w_0}\right)^2} r \, dr}{\int_0^\infty e^{-2\left(\frac{r}{w_0}\right)^2} r \, dr} = 1 - e^{-2\left(\frac{b}{w_0}\right)^2}$$

- 10 A partir de estos datos preliminares, es posible evaluar la asociación de varias fibras en cinta, por ejemplo, tres que experimentan colectivamente unafilamiento de sus extremos. Considerando una adición incoherente y en ausencia de fenómeno de acoplamiento entre modos, se puede obtener una ley de reparto de iluminación ilustrada en la figura 4.

De este modo, se obtiene una densidad de potencia global escasa a la salida de fibra, así como una superficie efectiva de transmisión reducida. Por lo tanto, una arquitectura de este tipo equivale a satisfacer las reglas de resistencia al flujo óptico aumentando al mismo tiempo la luminancia de la fuente transmisiva.

- 15 El núcleo de la invención reside en el uso de fibra cuyo núcleo presenta un perfil de índice. Este perfil puede ser, en concreto, de tipo parabólico o triangular.

Se puede considerar una ley de distribución del gradiente de índice de tipo Gloge-Marcatili tal como se describe, en concreto, en "Multimode theory of graded core fibers" D. Gloge, E.A.J. Marcatili, Bell Sys.Tech.J., vol. 52, 1973, p. 1.563-1.578:

$$n^2(r) = \begin{cases} n_1^2 \left(1 - 2\Delta(r/a)^\alpha\right), & r \leq a \\ n_1^2 (1 - 2\Delta) & |r| > a \end{cases}$$

- 20 Para $\alpha=2$ (perfil parabólico), el parámetro frecuencia normalizada de corte del grupo de modos adyacente al grupo de modo LP_{01} (unimodal) vale $V_c=3,518$, como se describe en el artículo "Cut-off frequency in radially inhomogeneous single-mode fibre" W.A. Gambling, D.N. Payne, H. Matsumura, Electr. Lettes 13 (5) 3 de marzo de 1977 p. 139, que se debe comparar con el valor del parámetro $V_c=2,4048$ para una fibra de escalón de índice ($\alpha=\infty$).

- 25 De este modo, se aumenta el radio de núcleo en la relación $V_c(\alpha=2)/V_c(\alpha=\infty)=1,463$. Esta relación es todavía más importante si se considera un perfil triangular para el que $V_c=4,381$, de donde: $V_c(\alpha=1)/V_c(\alpha=\infty)=1,8218$.

Una ley más general que establece la evolución del radio del modo en función del parámetro V, para una fibra de perfil parabólico, se da por D. Marcuse, "Gaussian approximation of the fundamental modes of graded-index fibers", JOSA 68 (1) ene. 1978 p. 103.

$$\frac{w_0}{a} = \frac{A}{V^{2/\alpha+2}} + \frac{B}{V^{3/2}} + \frac{C}{V^6}$$

- 30
$$A = \left(\frac{2}{5} \left(1 + 4 \left(\frac{2}{\alpha} \right)^{5/6} \right) \right)^{1/2}$$

$$B = e^{0,298/\alpha} - 1 + 1,478 \left(1 - e^{-0,077\alpha} \right)$$

$$C = 3,76 + e^{4,19/\alpha^{0,418}}$$

El conjunto de los parámetros y ecuaciones anteriormente citadas vienen a validar el concepto de la presente invención que propone la realización de fuentes láser con este tipo de gradiente de índice.

5 Este tipo de estructura permite no solamente aumentar el umbral de aparición de los efectos no lineales, así como el daño óptico, sino que permite igualmente reducir las pérdidas relacionadas con las curvaturas o microcurvaturas aumentando la diferencia de índice (es decir, el efecto de guiado óptico), puesto que se aumenta el parámetro V_c .

La figura 5 ilustra la evolución del radio del modo normalizado al radio de núcleo de una fibra en función del parámetro frecuencia normalizada y en función del gradiente de índice, la curva 5a es relativa a un coeficiente $\alpha = 1$, la curva 5b es relativa a un coeficiente $\alpha = 2$, la curva 5c es relativa a un coeficiente α infinito.

10 Un cálculo similar al desarrollado anteriormente para una fibra óptica de escalón de índice, pero para una fibra de gradiente parabólico afilada da la evolución del radio del modo en función de z .

En ese caso, la diferencia de índice relativa es $\Delta=4 \cdot 10^{-3}$ (cuatro veces mayor que para una fibra de escalón de índice) y la longitud de onda de corte $V_c=3,518$ se toma para la longitud de onda de $0,8 \mu\text{m}$

La figura 6 ilustra la evolución del radio del modo HE_{11} expresado en μm en función de la distancia en una estructura afilada de perfil parabólico, se representan igualmente los radios de núcleo (curva a) y de funda (curva b).

15 La figura 7 ilustra la evolución de la iluminación en función de la distancia en la parte cónica para una fibra de perfil parabólico cuyos parámetros son los siguientes: un radio $a = 3,446 \mu\text{m}$, una variación $\Delta = 4,10^{-3}$, una longitud de onda de corte $\lambda_c = 0,8 \mu\text{m}$. A la longitud de onda señal láser ($\lambda=1,07 \mu\text{m}$), el parámetro frecuencia normalizada inicial es igual a $V = 2,623$ para una conicidad idéntica a la tomada en cuenta en el análisis de una fibra afilada de escalón de índice.

20 De este modo, aparece que el empleo de una fibra láser de perfil de índice parabólico permite no solamente obtener un confinamiento importante a la longitud de onda láser, lo que reduce el valor del umbral para la transmisión coherente, sino igualmente que el acoplamiento con una parte cónica permite aumentar los umbrales de daño óptico en los extremos.

Sistema según la invención que incluye varias fibras láser acopladas

25 En el caso de dos guías paralelas, con los parámetros optogeométricos idénticos (modos caracterizados por una misma constante de propagación β), con un espaciamiento tal que las partes evanescentes puedan interceptar en parte la guía adyacente, en ausencia de pérdidas diferenciales, las ecuaciones acopladas se escriben:

$$\frac{d}{dz} \begin{pmatrix} a_1(z) \\ a_2(z) \end{pmatrix} + i \begin{pmatrix} \beta & C \\ C & \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1(z) \\ a_2(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

30 donde $a_j(z)$ corresponden a la amplitud de los campos complejos vehiculados por las guías $j=1,2$ y C es el coeficiente de acoplamiento entre guías.

La solución de estas ecuaciones para una amplitud incidente $a_1(0)$ y $a_2(0)$ de fase es:

$$a_1(z) = a_1(0) \cos(Cz) - ia_2(0) \text{sen}(Cz)$$

$$a_2(z) = a_2(0) \cos(Cz) - ia_1(0) \text{sen}(Cz)$$

sea de módulo $|a_j|^2$ lo que corresponde a la iluminación:

$$|a_1(z)|^2 = a_1^2(0) \cos^2(Cz) + a_2^2(0) \text{sen}^2(Cz)$$

$$|a_2(z)|^2 = a_2^2(0) \cos^2(Cz) + a_1^2(0) \text{sen}^2(Cz)$$

35 En el caso donde es incidente un solo campo, se encuentra la relación del acoplador lineal:

$$|a_1(z)|^2 = a_1^2(0) \cos^2(Cz)$$

$$|a_2(z)|^2 = a_1^2(0) \sin^2(Cz)$$

En presencia de dos campos incidentes, pero con una diferencia de fase entre sí $\Delta\phi$:

$$a_1(0) = a_1$$

$$a_2(0) = a_2 e^{i\Delta\phi}$$

5 Se obtienen las siguientes soluciones:

$$|a_1(z)|^2 = a_1^2(0) \cos^2(Cz) - a_1(0)a_2(0) \sin(2Cz) \sin(\Delta\phi) + a_2^2(0) \sin^2(Cz)$$

$$|a_2(z)|^2 = a_2^2(0) \cos^2(Cz) + a_1(0)a_2(0) \sin(2Cz) \sin(\Delta\phi) + a_1^2(0) \sin^2(Cz)$$

Un trazado de la evolución de la iluminación $|a_1(z)|^2$ con una longitud de onda dada se lleva a la figura 8 con los siguientes parámetros: $a_1(0)=1$, $a_2(0)=1$ y $C=1$.

10 Generalmente, el acoplador lineal explota la propiedad de direccionamiento de la potencia de salida en función de la excitación de una de las dos guías. Para esta aplicación, no se presta atención a las relaciones de fase entre dos ondas acopladas simultáneamente en los dos extremos. En cambio, si se busca obtener una transferencia coherente, se impone el análisis del comportamiento del acoplador que toma en cuenta la fase relativa inicial entre los dos campos, lo que explica el análisis anterior.

15 De manera todavía más general, en presencia de dos guías acopladas caracterizadas por diferencia de constante de propagación $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$ entre las estructuras, se obtiene:

$$|a_1(z)|^2 = \frac{1}{\left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)^2 + C^2} \left[\begin{array}{l} C^2 \cos^2 \xi (a_1^2 - a_2^2) - a_1 a_2 \Delta\beta C \cos \phi \sin^2 \xi + \left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)^2 a_1^2 + a_2^2 C^2 \\ -2a_1 a_2 C \sin \phi \sqrt{C^2 + \left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)^2} \cos \xi \sin \xi \end{array} \right]$$

$$|a_2(z)|^2 = \frac{1}{C^2 + \left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)^2} \left[\begin{array}{l} -C^2 \cos^2 \xi (a_1^2 - a_2^2) + a_1 a_2 \Delta\beta C \cos \phi \sin^2 \xi + \left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)^2 a_2^2 + a_1^2 C^2 \\ +2a_1 a_2 C \sin \phi \sqrt{C^2 + \left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)^2} \cos \xi \sin \xi \end{array} \right]$$

con:

$$\xi = z \sqrt{C^2 + \left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)^2}$$

20 Para $\phi = 0$ y en presencia de un solo campo incidente sobre el acoplador ($a_2(0)=0$), se obtiene la relación tradicional del acoplador direccional de desacuerdo de constante de propagación:

$$\frac{|a_2(z)|^2}{|a_1(0)|^2} = \frac{C^2}{C^2 + \left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)^2} \operatorname{sen}^2 \left(\sqrt{C^2 + \left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)^2} z \right)$$

Para dos guías dieléctricas idénticas de simetría de revolución cilíndrica ilustrada en la figura 9, el coeficiente de acoplamiento C se escribe:

$$C = \frac{\sqrt{2\Delta} U^2 K_0(Wd/a)}{a V^3 K_1^2(W)}$$

- 5 donde d representa la distancia entre los dos núcleos de radio a, U y W son las constantes de propagación transversas respectivamente en el núcleo y en la funda de la fibra óptica. $K_0(x)$ y $K_1(x)$ son unas funciones de Bessel modificadas de segunda especie de orden 0 y 1 y de argumento x.

Los parámetros U y W son el resultado de la resolución de las ecuaciones de Maxwell aplicadas a una estructura de guía de onda cilíndrica de dos dieléctricos.

10

$$\frac{U^2}{a^2} = k^2 n_1^2 - \beta^2$$

$$\frac{W^2}{a^2} = \beta^2 - k^2 n_2^2$$

β es la constante de propagación relacionada con el modo electromagnético que puede propagarse en régimen guiado. Es a partir de estas relaciones como se define el parámetro frecuencia normalizada:

$$V^2 = U^2 + W^2 = k^2 a^2 n_1^2 2\Delta$$

- 15 A partir de los datos optogeométricos de las fibras de escalón de índice, es posible evaluar la amplitud del coeficiente de acoplamiento en función de la separación normalizada $s=d/a$ entre los dos ejes longitudinales de guiado. En el caso de fibra láser para las que $\lambda_c=0,75 \mu\text{m}$, $\Delta=10^{-3}$ y $a=4,41 \mu\text{m}$, se tiene la evolución del coeficiente de acoplamiento entre las dos fibras ilustradas en la figura 10 y esto en función de la separación normalizada entre las dos guías sobre el campo espectral ocupado por la señal (láser).

- 20 Las figuras 11a, 11b y 11c ilustran el comportamiento del acoplador de fibra en función de la longitud de onda, de la distancia de propagación y del espaciamiento normalizado entre los dos núcleos de las fibras ópticas.

- Más precisamente la figura 11a ilustra la variación de la potencia vehiculada por la guía excitada del acoplador lineal de fibras en función de $s = d/a$ y de la distancia de propagación de $1,07 \mu\text{m}$, la figura 11b ilustra la potencia de la cota $z = 0,2 \text{ m}$ en función de la longitud de onda y en función del parámetro $s = d/a$ y la figura 11c ilustra la distribución espectral en el extremo de la guía excitada en función de la distancia: $z = 0,2 \text{ m}$ (curva 11c₄) a 1 m (curva 11c₀) para $s = 4$, con estas curvas intermedias 11c₃, 11c₂, 11c₁.
- 25

En el caso ilustrado, solo una de las dos guías está acoplada inicialmente a una onda óptica y el acoplamiento sigue la siguiente ley:

$$\frac{|a_1(z)|^2}{|a_1(0)|^2} = \cos^2(Cz)$$

- 30 En el marco de la presente invención, conviene considerar un acoplador lineal de estructura afilada. Una arquitectura de este tipo equivale a tener un coeficiente de acoplamiento que varía a lo largo de la propagación.

Para dos fibras acopladas con una conicidad de un 50 %, el coeficiente de acoplamiento depende de z mediante la dependencia de los diferentes parámetros:

$$C(z) = \frac{\sqrt{2\Delta} U(z)^2 K_0(W(z)d(z)/a(z))}{a(z) V(z)^3 K_1^2(W(z))}$$

puesto que $V(z) = ka(z)n_1\sqrt{2\Delta}$, de ello se desprende que los valores de las constantes de propagación transversas son función igualmente de z:

$$V(z)^2 = U(z)^2 + W(z)^2 = k^2 a(z)^2 n_1^2 2\Delta$$

5 Resulta que la relación $d(z)/a(z)$ es constante sea cual sea z para un estiramiento lineal, por lo tanto, homotético (conicidad constante).

La figura 12a representa la evolución del coeficiente de acoplamiento (m^{-1}) local en función de la distancia z y según la longitud de onda señal en μm .

Para evaluar el efecto de acoplamiento de una guía a la otra, conviene calcular el factor de acoplamiento efectivo en función de z, lo que traduce la integral:

$$C_{ef} z = \int_0^z C(z') dz'$$

10

La figura 12b da el factor de acoplamiento efectivo $C_{ef}z$ con la distancia z en la parte afilada.

Con estas variaciones longitudinales del coeficiente de acoplamiento, la iluminación de la guía excitada ve su evolución presentada en la figura 12c, que sigue la ley:

$$\frac{|a_1(z)|^2}{|a_1(0)|^2} = \cos^2 \left(\int_0^z C(z') dz' \right)$$

15 La figura 12c ilustra la distribución de iluminación normalizada de la guía excitada en una configuración de acoplador lineal de estructura cónica de $1,07 \mu m$ (curva 12c₀) y de $1,09 \mu m$ (curva 12c₁) en función de la distancia de propagación.

El concepto multivías de fibras óptica puede extenderse y las ecuaciones de acoplamiento en ausencia de pérdidas pueden escribirse:

$$\frac{da_m}{dz} + i\beta_m a_m = -i \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^N C_{mn} a_n$$

20

Ejemplos de realización de sistema multivías de fibras láser según la invención

Según una variante de la invención, las fibras láser están ensambladas según una simetría cuadrada como se ilustra en la figura 13a. Según esta configuración, conviene discernir dos coeficientes de acoplamiento entre fibras: un coeficiente de acoplamiento directo C_L y un coeficiente de acoplamiento transverso C_T .

25 Las ecuaciones acopladas se escriben:

$$\frac{da_1}{dz} + i\beta a_1 = -i(a_2 + a_4)C_L - ia_3C_T$$

$$\frac{da_2}{dz} + i\beta a_2 = -i(a_1 + a_3)C_L - ia_4C_T$$

$$\frac{da_3}{dz} + i\beta a_3 = -i(a_2 + a_4)C_L - ia_1C_T$$

$$\frac{da_4}{dz} + i\beta a_4 = -i(a_1 + a_3)C_L - ia_2C_T$$

30 Se puede considerar que las guías son idénticas y los coeficientes de acoplamiento independientes del estado de polarización. La ecuación característica se obtiene sustituyendo la función:

$$a_j = B_j e^{-i\beta z} e^{-i\Lambda_j z}$$

donde B_j y Λ_j son respectivamente los elementos de los vectores propios y los valores propios.

Se obtiene la siguiente ecuación matricial

$$ie^{-i(\beta+\lambda)z} \begin{vmatrix} -\lambda & C_L & C_T & C_L \\ C_L & -\lambda & C_L & C_T \\ C_T & C_L & -\lambda & C_L \\ C_L & C_T & C_L & -\lambda \end{vmatrix} \begin{matrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{matrix} = 0$$

5 cuya ecuación característica se escribe:

$$\begin{vmatrix} -\lambda & C_L & C_T & C_L \\ C_L & -\lambda & C_L & C_T \\ C_T & C_L & -\lambda & C_L \\ C_L & C_T & C_L & -\lambda \end{vmatrix} = 0$$

Los cuatro valores propios son:

$$\lambda_1 = C_T - 2C_L$$

$$\lambda_2 = C_T + 2C_L$$

$$\lambda_3 = \lambda_4 = -C_T$$

10

y los vectores propios asociados son:

$$\vec{B}_1 = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \vec{B}_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \vec{B}_3 = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \vec{B}_4 = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

De este modo, se definen cuatro modos posibles.

En presencia de un campo incidente único, el reparto de las iluminaciones se da por las relaciones:

$$I_1(z) = \frac{1}{4} \left(1 + 2 \cos(2C_L z) \cos(2C_T z) + \cos^2(2C_L z) \right)$$

$$I_2(z) = \frac{1}{4} \sin^2(2C_L z)$$

$$I_3(z) = \frac{1}{4} \left(1 - 2 \cos(2C_L z) \cos(2C_T z) + \cos^2(2C_L z) \right)$$

$$I_4(z) = \frac{1}{4} \sin^2(2C_L z)$$

15

con $C_T(s)=C_L(s/\cos(\pi/4))$. La distribución de las iluminaciones se ha evaluado en función de la distancia de propagación considerando en este ejemplo las características de un acoplador lineal de fibras con una relación $s=5$. Las figuras 13b y 13c permiten observar los fenómenos de acoplamiento entre guías en función de la distancia de propagación y de la longitud de onda. Más concretamente, la figura 13b ilustra la evolución de las iluminaciones de 1,06 μm en función de z para una potencia unidad inyectada en la guía 1 (curva 13b₁). Las iluminaciones en 2 y 4 siguen la curva 13b₂ y la iluminación en la guía 3 se representa por la curva 13b₃. La figura 13c ilustra la evolución de las iluminaciones de 1,09 μm en función de z para una potencia unidad inyectada en la guía 1 (curva 13c₁). Las iluminaciones en 2 y 4 siguen la curva 13c₂₋₄ y la iluminación en la guía 3 se representa por la curva 13c₃.

5 El comportamiento de la transferencia entre las guías 1 y 3 traduce la existencia de dos coeficientes de acoplamiento (C_T y C_L)

La figura 13d permite observar mejor la ley de distribución de las iluminaciones en la guía excitada en función de la longitud de onda, que ilustra la distribución de la iluminación en la guía 1 en función de z y para $\lambda\lambda= 1,06$ (curva 13d₁) y 1,09 μm (curva 13d₂).

15 Según otra variante de la invención, el sistema láser puede incluir una geometría de apilamiento simétrico de configuración cilíndrica.

Esta configuración se ilustra en la figura 14a. Tradicionalmente, la iluminación inicial, puede llevarse por la fibra central. En ese caso, las iluminaciones vehiculadas por las fibras 1 a 6 son el resultado del acoplamiento entre fibras separadas por una distancia común s (disposición triángulo isósceles). Las leyes de iluminación se escriben:

$$I_0(z) = 1 - \frac{6}{7} \text{sen}^2(\sqrt{7}C_L z)$$

$$I_n(z) = \frac{1}{7} \text{sen}^2(\sqrt{7}C_L z) \quad n = 1, \dots, 6.$$

20 La figura 14b da la evolución de la iluminación de la fibra central, así como la obtenida sobre una de las fibras de acoplamiento periférico en función de la distancia de propagación con $s = 5$ y de 1,07 μm e ilustra la distribución de la iluminación en la fibra central y una de las seis fibras en la periferia con $s = 5$ a 1,07 μm en función de la distancia de propagación.

25 La figura 14c ilustra la distribución espectral de la iluminación en la fibra central y en una de las seis fibras en la periferia con $s = 5$ en función de la distancia de propagación para $z_0 = 0,2$, $z_1 = 0,4$, $z_2 = 0,6$, $z_3 = 0,8$ y $z_4 = 1$ m. Los pares de curvas respectivamente ($14c_{z_0}$, $14c_{z_0'}$), ($14c_{z_1}$, $14c_{z_1'}$), ($14c_{z_2}$, $14c_{z_2'}$), ($14c_{z_3}$, $14c_{z_3'}$), ($14c_{z_4}$, $14c_{z_4'}$), son relativas a la distribución espectral a la salida de la fibra central y a la salida de una fibra adyacente.

30 Para realizar este tipo de configuración, una geometría posible consiste en tomar un haz de fibras láser con un estiramiento en el extremo. Para ello, es posible asociar N fibras f_i alrededor de una fibra central f_c , habiendo experimentado un extremo de las fibras un estiramiento de manera que se obtenga una estructura de acoplamiento múltiple. La figura 15a ilustra una vista en perspectiva de una asociación de este tipo.

35 Es posible igualmente realizar una preforma compuesta por múltiples barrote que pueden ser tradicionalmente de sílice localmente dopados por una tierra rara, como se ilustra en la figura 15b que representa una vista en corte de una preforma P de este tipo y de sus fibras en la periferia f_{ij} alrededor de una fibra central f_c . El barrote central de doble índice puede estar dopado o no dopado con el fin de asegurar la vía acoplador de salida de la transmisión láser. A continuación, se fibra el conjunto con una ley de homotecia sobre las separaciones entre núcleos, después uno de los extremos experimenta un estiramiento.

Una fibra de este tipo de múltiples núcleos está adaptada para el bombeo eficaz de las zonas dopadas explotando los modos de la estructura de guiado de la onda de bomba que presentan una dependencia de azimut no nula.

40 La geometría del láser de fibras puede presentarse entonces con la forma ilustrada en la figura 16a:

- de una fibra cebo destinada a recibir una potencia de bomba procedente de diodos láser;
- de un conjunto de fibras acopladas radialmente y estirada con el fin de optimizar el acoplamiento;
- de una fibra central por la que emerge el haz láser.

45 El extremo de esta fibra puede disponer de un reflector de Bragg que hace la función de espejo de retroacción o de un espejo externo. Se efectúa una autoorganización en función de los ida y retorno en el conjunto de las cavidades.

Según otra variante de la invención, el sistema láser comprende:

- una estructura de núcleo de gradiente de índice parabólico o triangular;
 - una asociación de acoplador multinúcleos (monolítico en forma de una preforma específica o multifibras), estando el conjunto estirado en un extremo;
- 5 - una óptica axicon en el otro extremo.

Una arquitectura de este tipo permite controlar el estado de polarización, lo que equivale a disponer de acopladores específicos y a realizar una operación de multiplexación sobre los estados de polarización como se ilustra en la figura 16b.

- 10 De manera general, para realizar las fibras que presentan al menos sobre un tramo una región filada, se puede proceder a una operación de ataque químico (por ejemplo, con el empleo del ácido fluorhídrico HF).

Se puede diseñar igualmente la soldadura de una fibra de extremo dedicada no dopada para obtener los perfiles buscados (con la condición de optimizar las dos estructuras de guiado con el fin de realizar la adaptación modal).

Según una variante de la invención, las fibras de gradiente de índice de núcleo pueden estar realizadas según el procedimiento descrito más abajo.

- 15 En efecto, se conoce que se puede hacer crecer la índice de un núcleo de fibra de sílice SiO_2 incorporándole unos porcentajes molares, por ejemplo, de óxido de germanio. De este modo, la figura 17 ilustra la evolución del índice de refracción de la sílice compuesta, realizada a partir de un flujo gaseoso cargado de cationes de tipo Ge, P o B.

- 20 De este modo, procediendo a un depósito químico en fase vapor, se puede obtener en el interior de un barrote el depósito de capas internas de índice variable en función de la concentración del flujo cargado de porcentaje variable de cationes de tipo Ge, que permite obtener por la misma el gradiente radial de índice buscado en la presente invención, como se ilustra en la figura 18.

REIVINDICACIONES

1. Sistema de fibra láser de potencia que transmite a una longitud de onda señal (λ) y que incluye varias fibras monomodo, repartidas de manera que se crea un acoplamiento modal entre dichas fibras, siendo una de las fibras una fibra emergente para la longitud de onda señal del haz láser de transmisión, incluyendo cada una de dichas fibras al menos una funda exterior y un núcleo, presentando cada una de dichas fibras en su núcleo un gradiente de índice radial e incluyendo al menos en una parte de su longitud, un tramo de geometría que presenta un radio de núcleo de fibra de gradiente decreciente entre un extremo denominado de entrada del tramo y un extremo denominado de salida del tramo, siendo los parámetros de radio de núcleo y de variación de índice entre la funda y la fibra al nivel del extremo de entrada tales que la frecuencia normalizada V definida a la longitud de onda señal es inferior a la frecuencia normalizada de corte V_c a partir de la cual la fibra presenta un carácter monomodo.
2. Sistema de fibra láser de potencia según la reivindicación 1, **caracterizado porque** el gradiente de índice es de tipo parabólico.
3. Sistema de fibra láser de potencia según la reivindicación 1, **caracterizado porque** el gradiente de índice es de tipo triangular.
4. Sistema de fibra láser de potencia según la reivindicación 1, **caracterizado porque** cada una de dichas fibras incluye un tramo de geometría cónica, un primer radio de funda (r_1) y un segundo radio de núcleo (r_2), estando los primero y segundo radios definidos respectivamente por las siguientes ecuaciones:
- $$r_1(z) = r_{1c}(1 - m_1z)$$
- $$r_2(z) = r_{2c}(1 - m_2z)$$
5. Sistema de fibra láser de potencia según una de las reivindicaciones 1 a 4, **caracterizado porque** las fibras están repartidas según una geometría matricial en un plano perpendicular a la longitud de dichas fibras.
6. Sistema de fibra láser de potencia según una de las reivindicaciones 1 a 4, **caracterizado porque** las fibras están repartidas de manera circular alrededor de una fibra central.
7. Sistema de fibra láser de potencia según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** comprende una preforma que incluye un conjunto de fundas y de núcleos de fibras individuales.
8. Sistema de fibra láser de potencia según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** comprende:
- una fibra cebo destinada a recibir una potencia de bomba procedente de diodos láser;
 - un conjunto de fibras acopladas radialmente y estiradas con el fin de optimizar el acoplamiento;
 - una fibra central por la cual emerge la longitud de onda señal del haz láser.
9. Sistema de fibra láser de potencia según la reivindicación 8, **caracterizado porque** la fibra emergente incluye una función espejo.
10. Sistema de fibra láser de potencia según la reivindicación 9, **caracterizado porque** la fibra emergente incluye un reflector de Bragg.
11. Sistema de fibra láser de potencia según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** comprende unos medios de tipo axicon acoplados a los extremos de las fibras opuestas a las que incluyen los tramos cónicos.
12. Sistema de fibra láser de potencia según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** incluye al menos una fibra que presenta una funda de sílice.
13. Sistema de fibra láser de potencia según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** incluye al menos una fibra que presenta un núcleo de fibra que comprende sílice cargada de GeO_2 .
14. Sistema de fibra láser de potencia según la reivindicación 13, **caracterizado porque** el núcleo de fibra comprende unas capas periféricas de tasas variables de GeO_2 de manera que se asegure un gradiente de índice radial en el interior del núcleo.
15. Sistema de fibra láser de potencia según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** incluye al menos una fibra que presenta un núcleo de fibra de sílice dopada con unos iones de tierra rara.

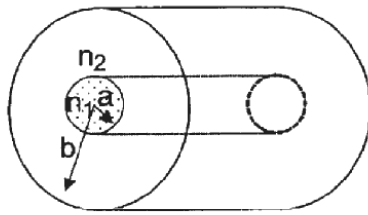


FIG. 1

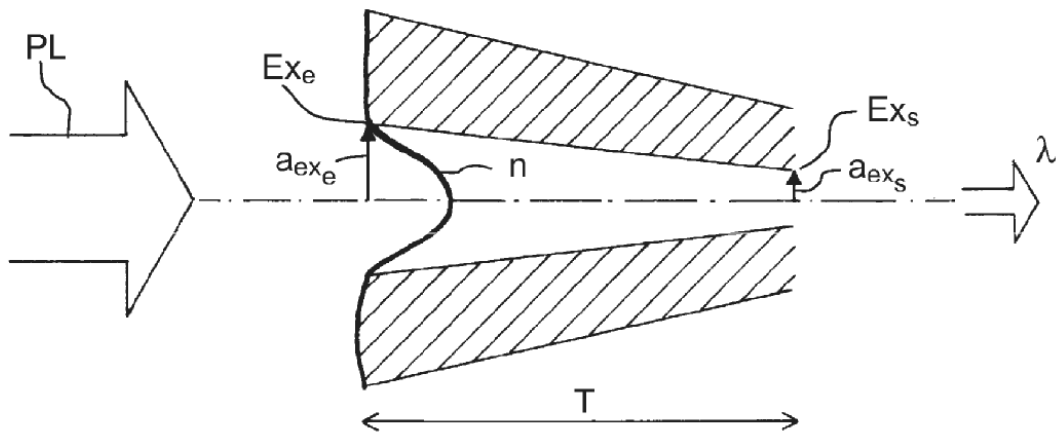


FIG. 2

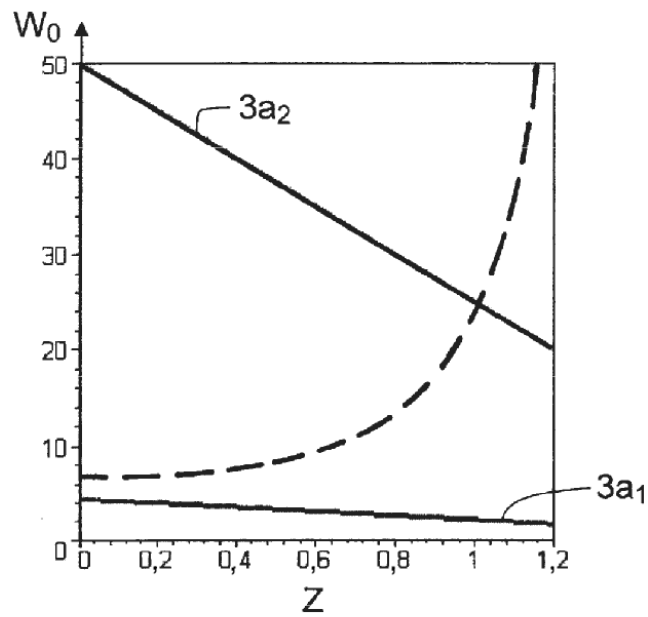


FIG. 3a

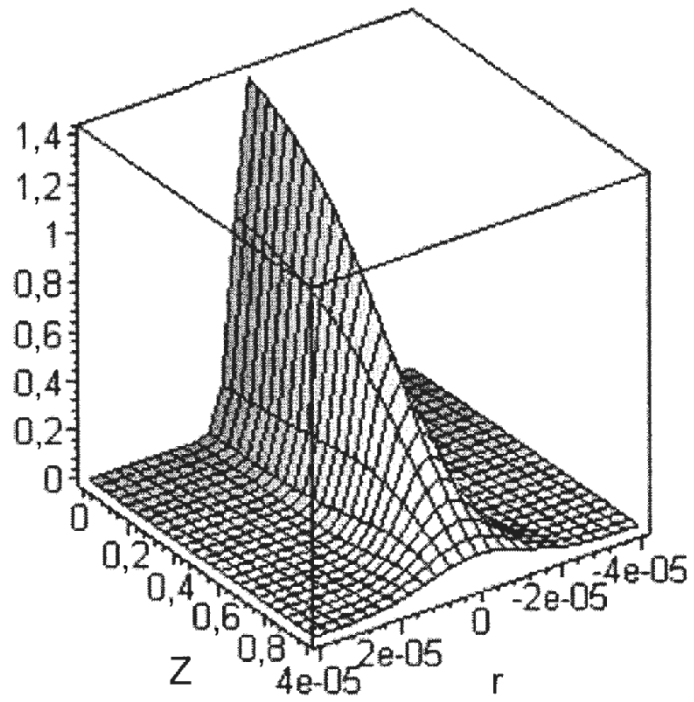


FIG.3b

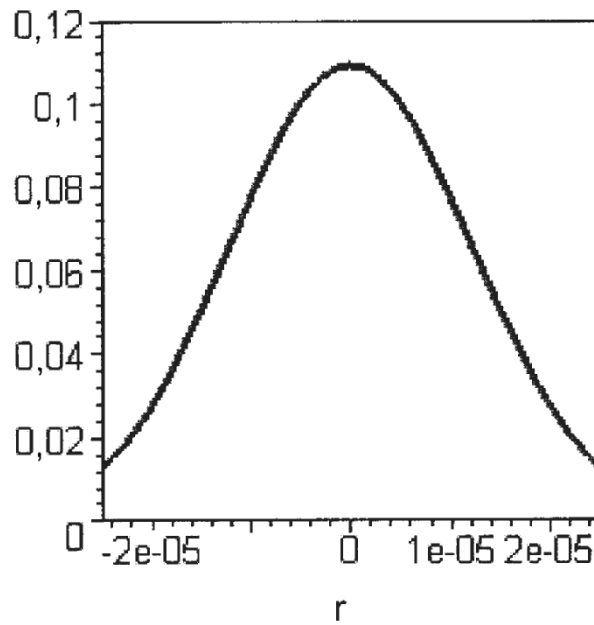


FIG.3c

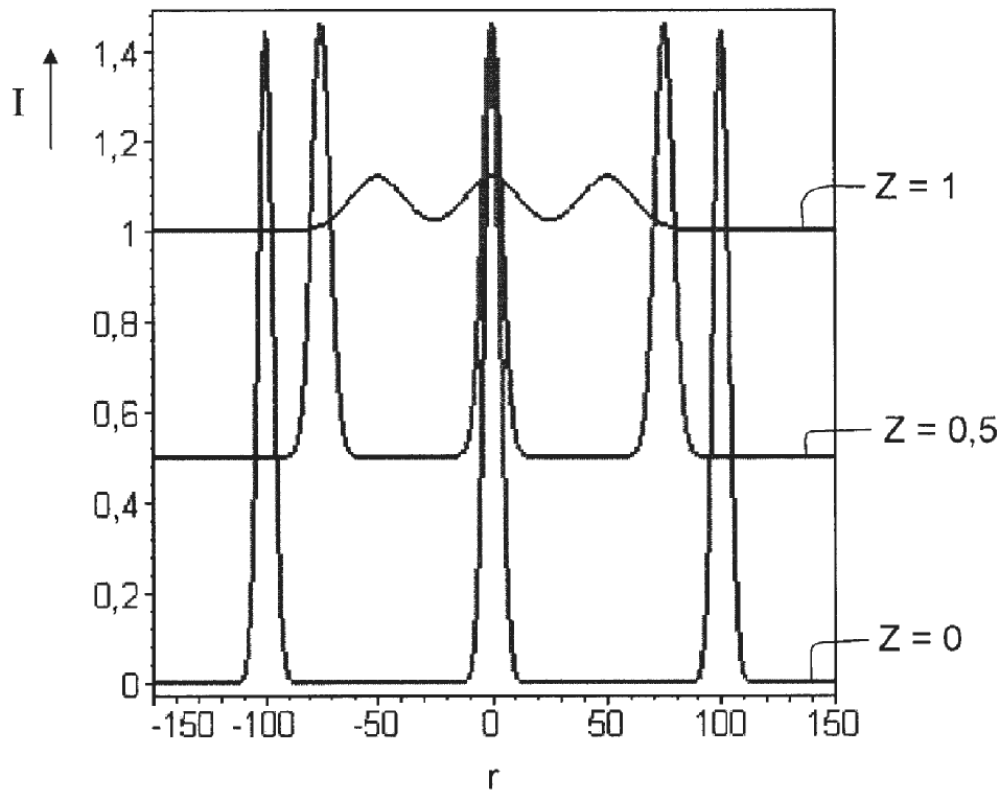


FIG.4

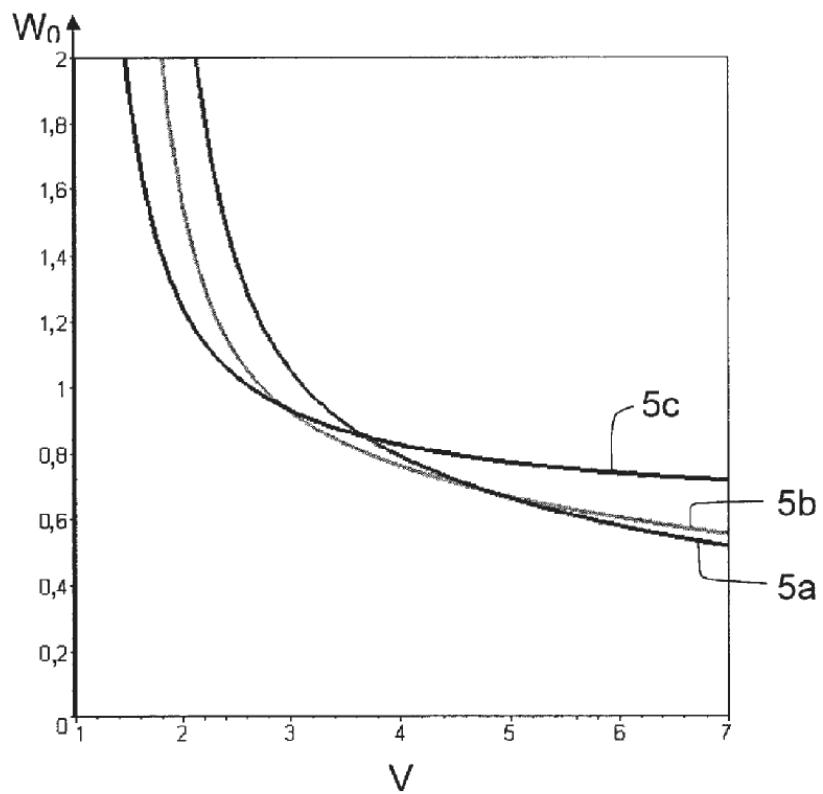


FIG.5

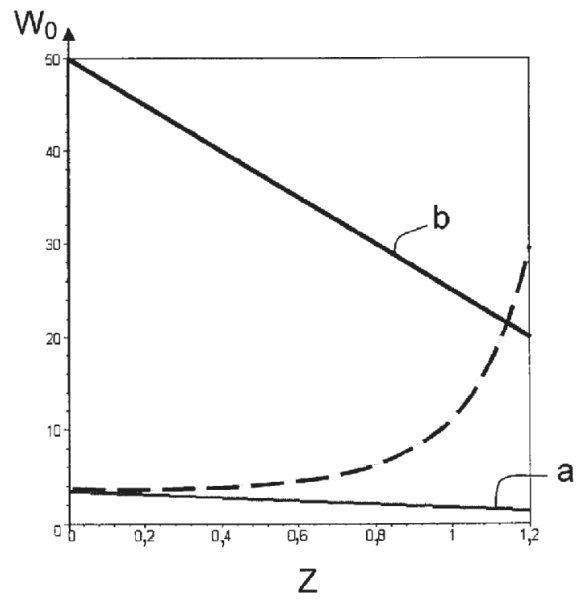


FIG.6

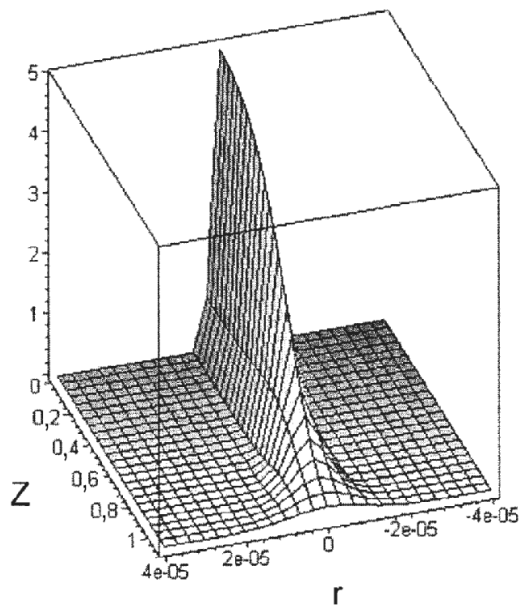


FIG.7

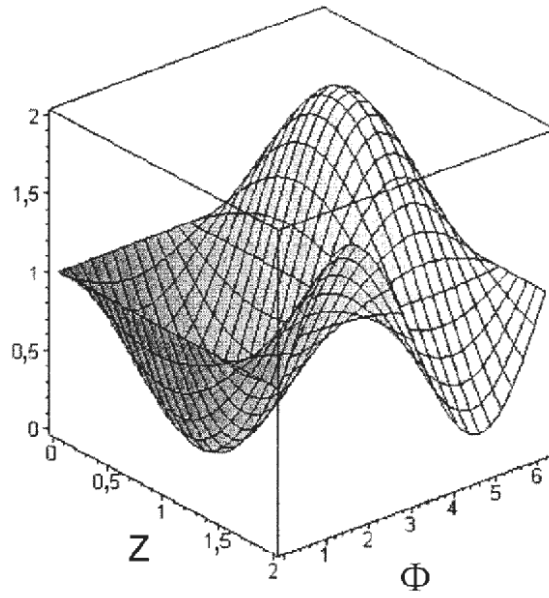


FIG.8

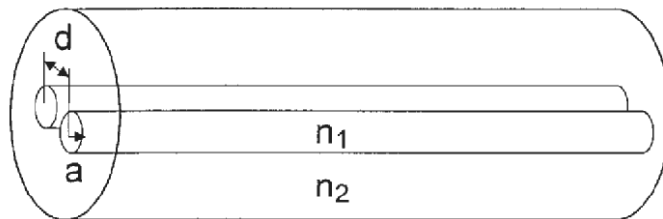


FIG.9

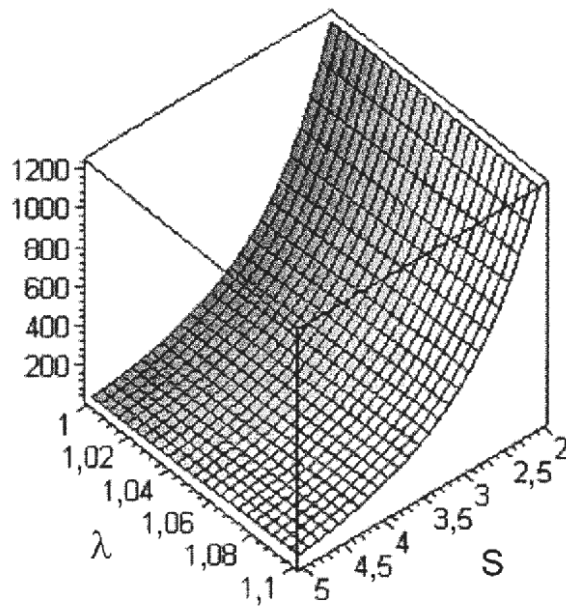


FIG.10

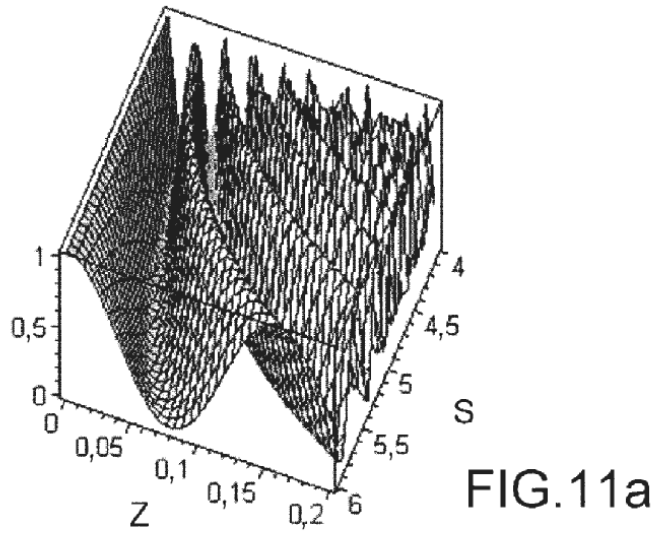


FIG.11a

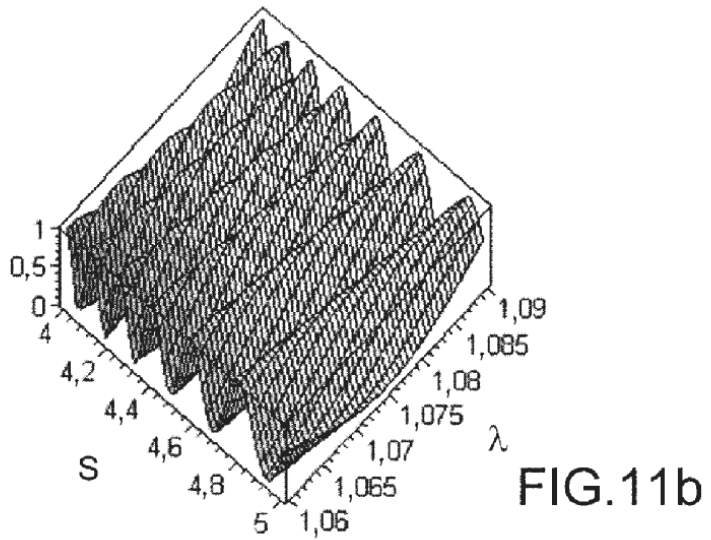


FIG.11b

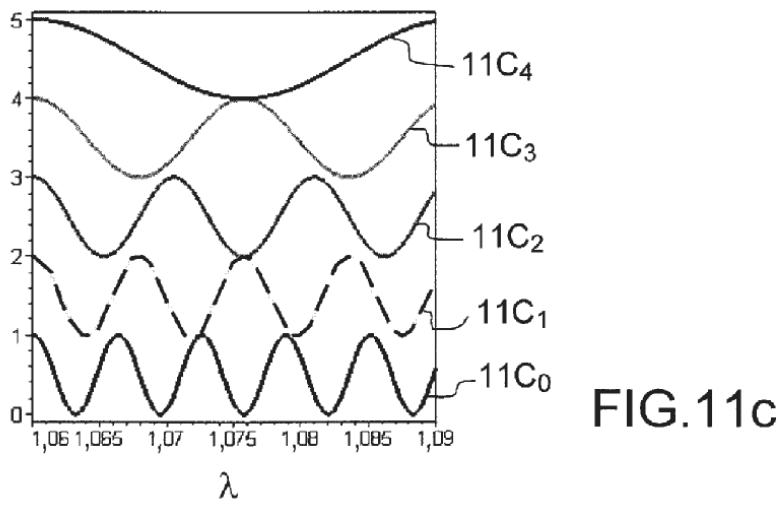


FIG.11c

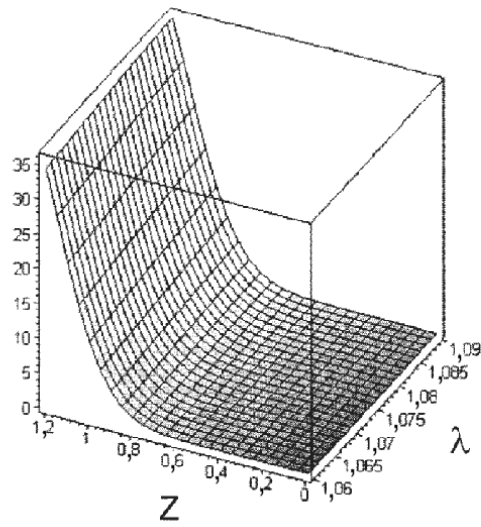


FIG.12a

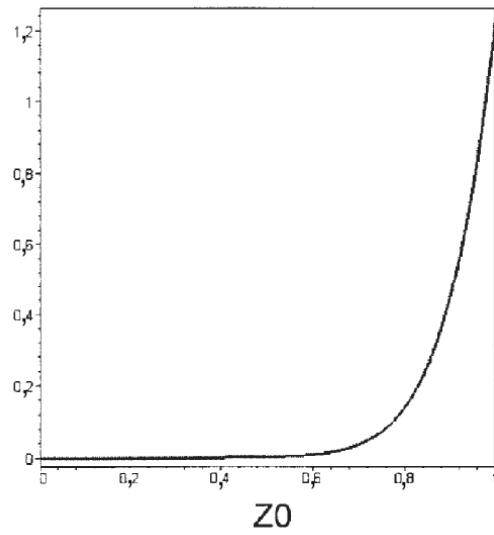


FIG.12b

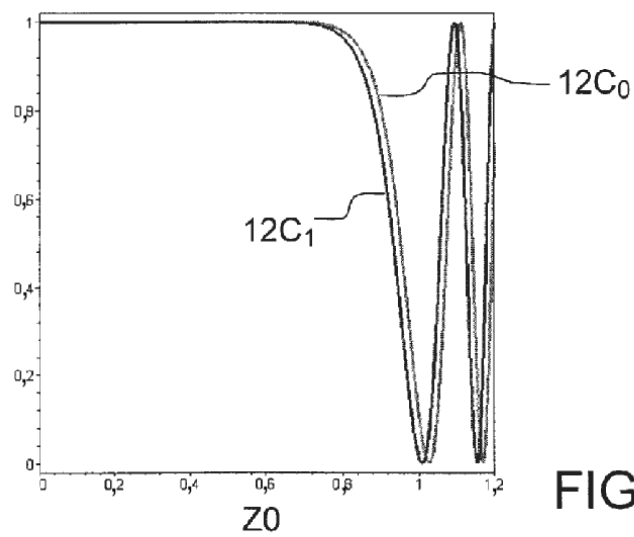


FIG.12c

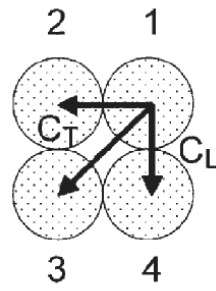


FIG.13a

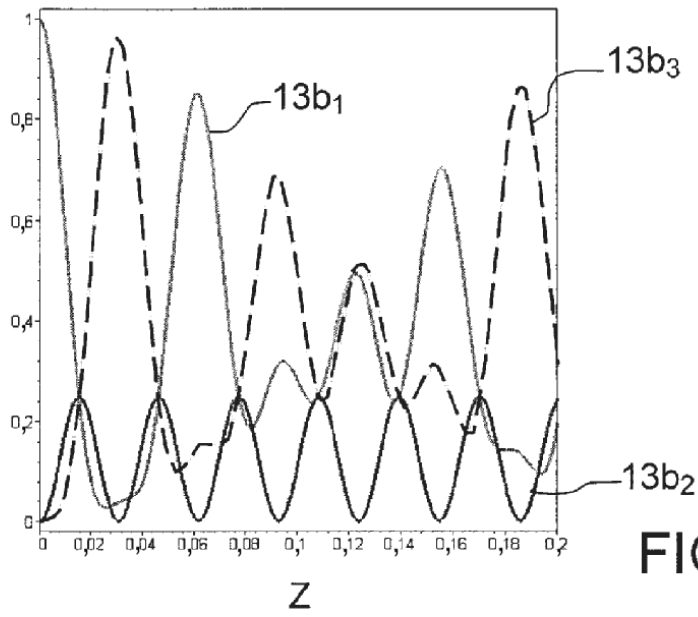


FIG.13b

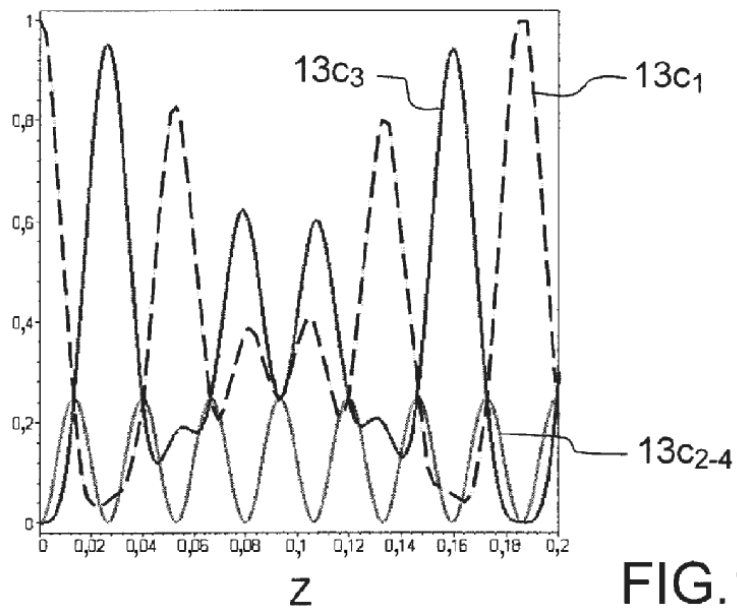
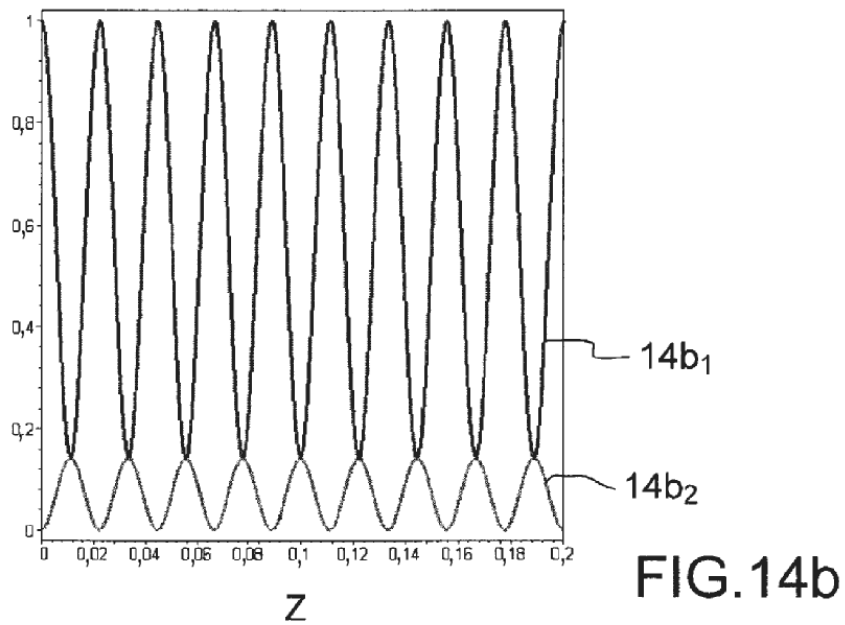
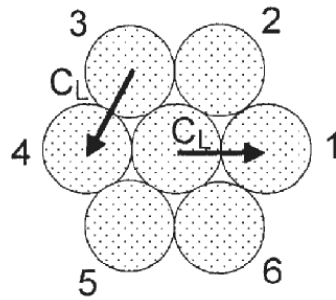
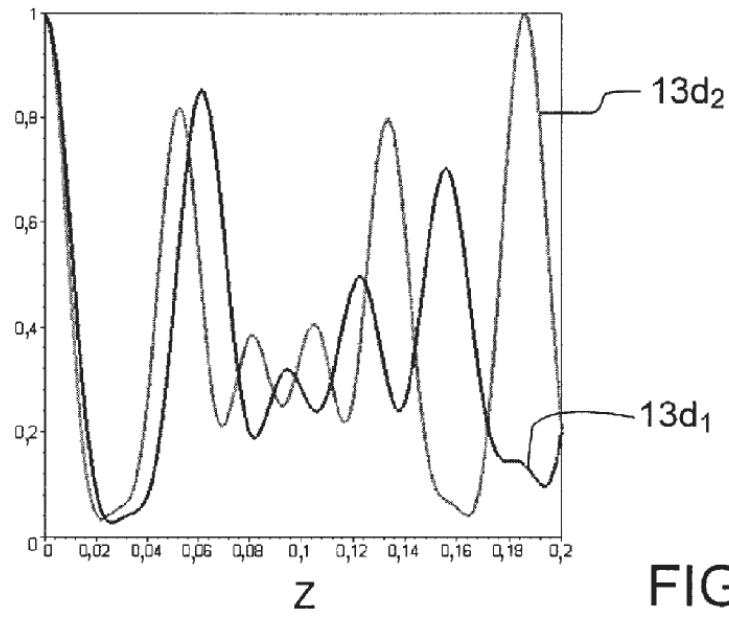


FIG.13c



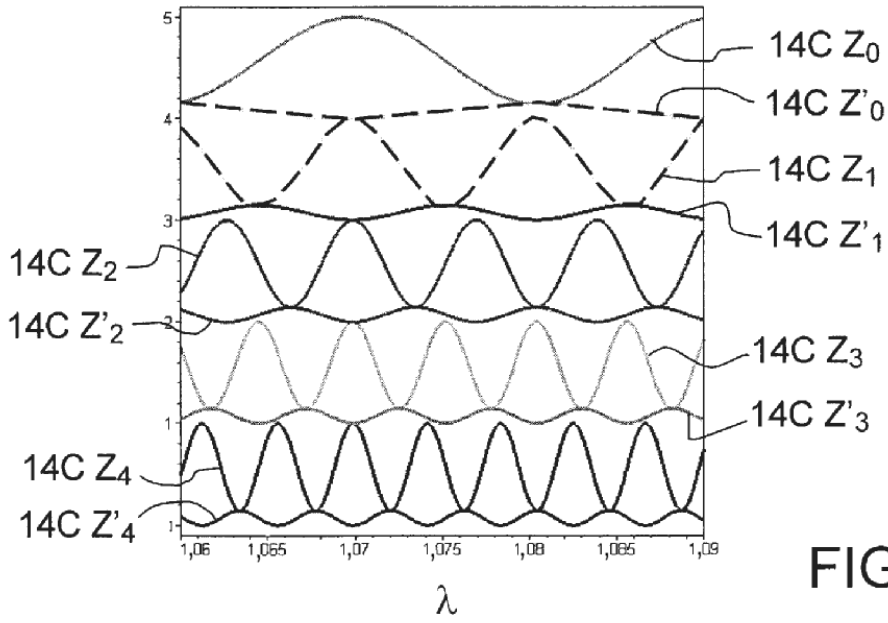


FIG. 14c

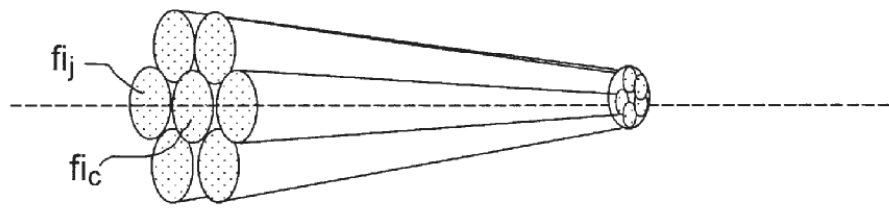


FIG. 15a

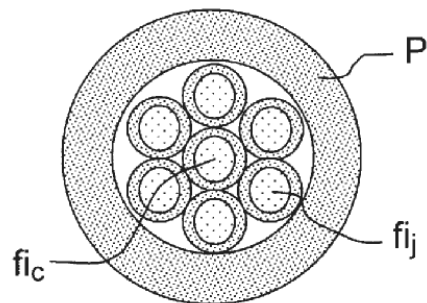


FIG. 15b

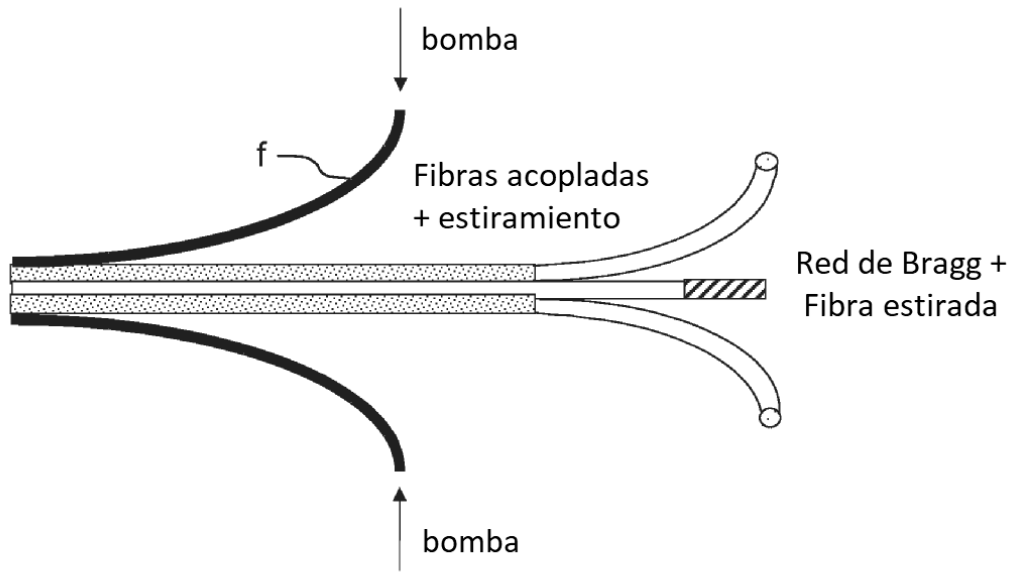


FIG.16a

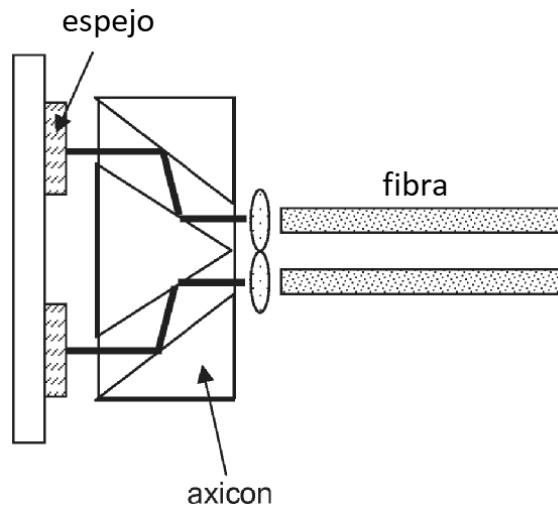


FIG.16b

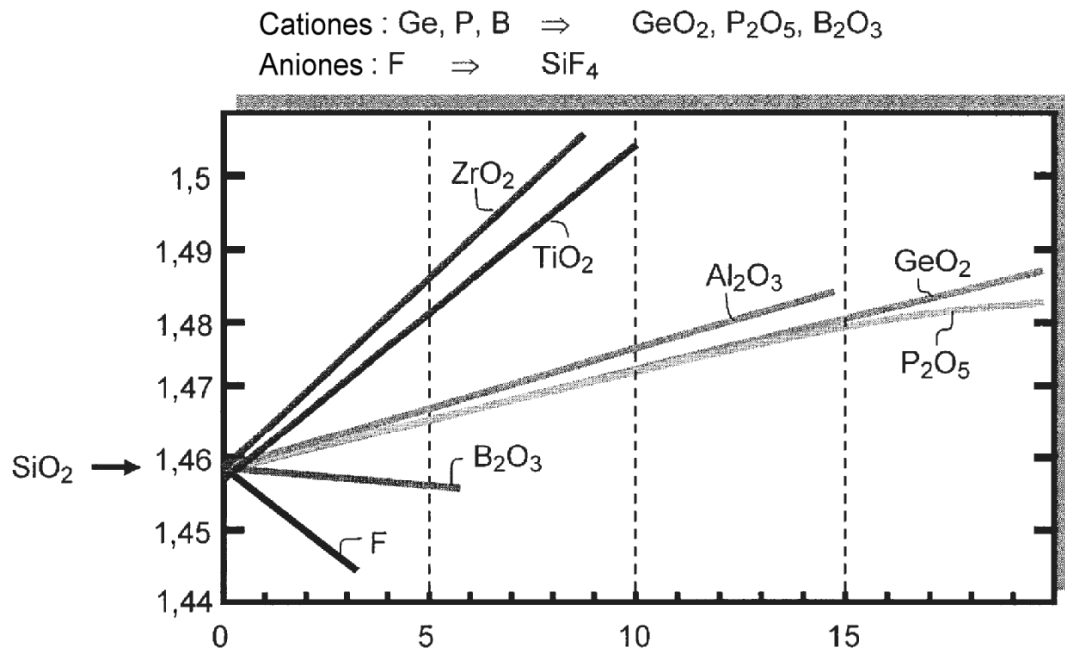


FIG.17

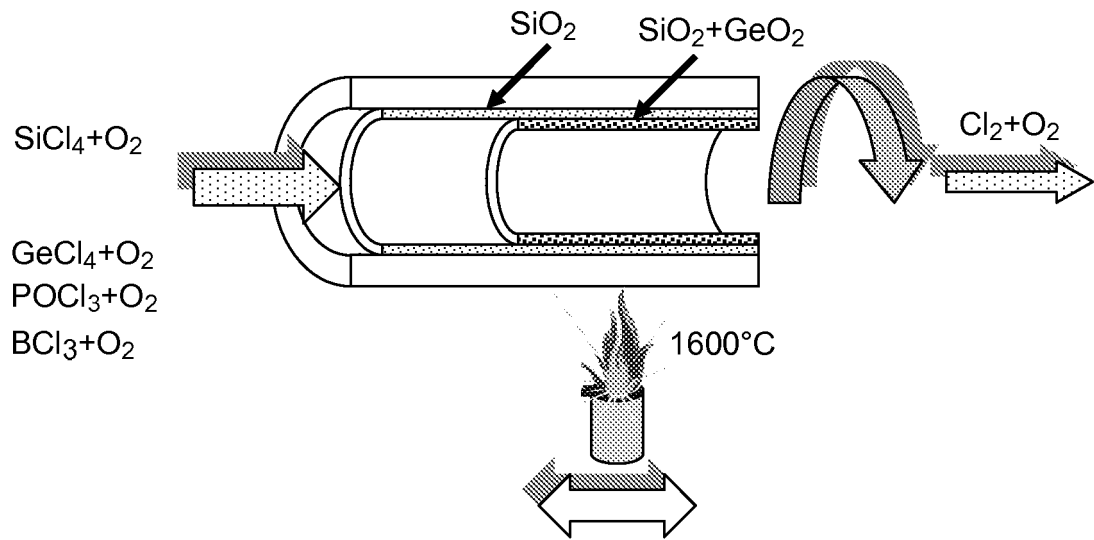


FIG.18