

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 653 196**

51 Int. Cl.:

H01S 3/0941 (2006.01)

H01S 3/16 (2006.01)

H01S 3/08 (2006.01)

H01S 3/067 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **22.07.2008 PCT/EP2008/059611**

87 Fecha y número de publicación internacional: **29.01.2009 WO09013294**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.07.2008 E 08775283 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.09.2017 EP 2179326**

54 Título: **Fibra láser de doble frecuencia por mezcla de ondas en fibras ópticas amplificadoras**

30 Prioridad:

24.07.2007 FR 0705379

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

06.02.2018

73 Titular/es:

**THALES (100.0%)
Tour Carpe Diem, Place des Corolles, Esplanade
Nord
92400 Courbevoie, FR**

72 Inventor/es:

**MOLIN, STÉPHANIE;
DOLFI, DANIEL;
MORVAN, LOÏC y
HUIGNARD, JEAN-PIERRE**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 653 196 T3

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

DESCRIPCIÓN

Fibra láser de doble frecuencia por mezcla de ondas en fibras ópticas amplificadoras

5 La invención se refiere a láseres de doble frecuencia "totalmente de fibra" que incluyen la mezcla de dos ondas en unas fibras ópticas amplificadoras de mantenimiento de la polarización. Cada una de las dos frecuencias ópticas obtenidas se propaga en polarización rectilínea según uno de los ejes propios de la fibra.

Tales láseres tiene como objetivo responder a la necesidad de fuentes de microondas de gran pureza espectral, necesarias para las futuras generaciones de sistemas radar, pero también de manera general, para la distribución de referencias de frecuencia en los sistemas complejos y en unos sensores de fibra.

10 Como ya fue el caso en los sistemas de telecomunicaciones, hoy en día la óptica está sustituyendo progresivamente a las conexiones con cables coaxiales en los sistemas radar. En efecto, además de su menor peso, volumen, coste y su insensibilidad a las perturbaciones electromagnéticas, las fibras ópticas presentan frente al cable coaxial las siguientes ventajas fundamentales: tienen pocas pérdidas (0,3 dB/km frente a 1000 dB/km para los cables) y su dispersión es despreciable sobre un amplio ancho de banda de hiperfrecuencia (una portadora óptica, de frecuencia próxima a 100 THz, puede modularse en un intervalo de 20 a 40 GHz sin límites debido a la dispersión cromática de la fibra, no superando el ancho de banda de un cable algunos GHz).

20 De este modo, determinadas funciones realizadas totalmente en el campo eléctrico tienden hoy en día a apelar a tecnologías fotónicas. Por ejemplo, mientras que los sintetizadores actuales suministran señales microondas mediante la mezcla sucesiva de frecuencias eléctricas más débiles, degradando la relación de señal sobre ruido en cada multiplicación, la generación de ondas de hiperfrecuencia gracias a la mezcla heterodina de dos frecuencias ópticas en torno a 1550 nm puede responder a las necesidades de osciladores locales de gran pureza espectral en los futuros radares ópticos. Para este tipo de aplicación, es necesario que el batimiento tenga una anchura espectral inferior a un kHz y que el ruido de fase circundante sea aproximadamente de - 130 dBc/Hz a 10 kHz de la frecuencia central de la señal [la unidad dBc significa decibelios con respecto a la portadora (decibels relative to the carrier en inglés) y representa la relación (en decibelios) de potencia de una señal con respecto a su portadora. La unidad dB se considera como una unidad del SI, pero puede sustituirse por $10 \times \log_{10}$ (potencia señal/ potencia portadora). Hace tiempo que se han propuesto varias técnicas con el objetivo de realizar unos láseres de doble frecuencia capaces de generar tales señales de microondas.

30 Un primer procedimiento consiste en la utilización de diodos láser de doble frecuencia o de dos diodos láser acoplados como se describe en las siguientes referencias: T. Hidaka, S. Matsuura, M. Tani y K. Sakai, "CW terahertz wave generation by photomixing using a two-longitudinal mode laser diode", Electron. Lett. Vol. 33, 2039 (1997), M.D. Pelusi, HF Liu y D. Novak, "THz optical beat frequency generation from a single mode locked semiconductor laser", Appl. Phys. Lett. Vol. 71, 449 (1997), X. Wang, W. Mao, M. Al-Mumin, S. A. Pappert, J. Hong y G. Li, "Optical generation of microwave/millimeter-wave signals using two-section gain-coupled DFB lasers", IEEE Phot. Tech. Lett. Vol. 11, N.º 10, 1292 (1999).

35 Las ventajas de estas fuentes son su compactibilidad y su gran capacidad de sintonización, dado que permiten generar señales microondas de frecuencia ajustable en varias decenas de GHz. No obstante, es difícil obtener una anchura espectral suficiente utilizando diodos láser; en efecto, la calidad espectral del batimiento obtenido sigue siendo insuficiente con respecto a las exigencias del radar, siendo su anchura a media altura típicamente del orden de la decena de MHz.

40 Otras técnicas aprovechan las propiedades de los láseres de estado sólido y se describen en concreto en las siguientes referencias: M. Alouini, B. Benazet, M. Vallet, M. Brunel, P. Di Bin, F. Bretenaker, A. Le Floch y P. Thony, "Offset phase locking of Er: Yb: Glass Laser eigenstates for RF Photonics applications", IEEE Phot. Tech. Lett. Vol. 13, N.º 4, 367 (2001), A.J.C. Vieira, P.R. Herczfeld, A. Rosen, M. Ermold, E.E. Funk, W.D. Jemison y K.J. Williams, "A mode-locked microchip laser optical transmitter for fiber radio", IEEE TTTM, Vol. 49, N.º 10, 1882 (2001), L. Morvan, D. Dolfi, J.-P. Huignard, S. Blanc, M. Brunel, M. Vallet, F. Bretenaker y A. Le Floch, "Dual-frequency laser at 1.53 μm for generating high-purity optically carried microwave signals up to 20 GHz", CLEO 2004.

50 Tales láseres son extremadamente compactos y el batimiento de hiperfrecuencia obtenido presenta excelentes características espectrales: la anchura espectral puede ser inferior al kHz y el nivel de ruido de fase al pie de la señal responde perfectamente a las exigencias radar (hasta - 130 dBc/Hz a 20 kHz de la portadora de hiperfrecuencia). Además, la sintonización de la señal de microondas generada se extiende sobre algunos GHz. Estas fuentes responden a las necesidades de futuros radares, su único punto débil reside en la necesidad de lazos de control optoelectrónico de bloqueo de fase, que garantice la estabilidad de la frecuencia de batimiento de las microondas.

55 Ciertas soluciones que pretenden utilizar dispositivos totalmente de fibra ya implementan unas fibras ópticas dopadas para realizar láseres de doble frecuencia. W.H. Loh, J.P. de Sandro, G.J. Cowle, B.N. Samson y A.D. Ellis, "40 GHz optical-millimetre wave generation with dual polarisation distributed feedback fibre laser", Electr. Lett., Vol. 33, N.º 7, 594 (1997), S.V. Chernikov, R. Kashyap, P.F. McKee, J.R. Taylor, "Dual frequency all fibre grating laser source", Electr. Lett. Vol. 29, N.º 12, 1089 (1993), S. Li, H. Ding y K.T. Chan, "Erbium-doped fibre lasers for dual wavelength operation", Electr. Lett. Vol. 33, N.º 1, 52 (1997), describen unos dispositivos en los que unas redes de

- 5 Bragg foto inscritas en unas fibras ópticas se utilizan como espejos en los láseres de fibra dopada con erbio, para alcanzar un funcionamiento de doble frecuencia. Para estos dispositivos, es posible, generar unos batimientos de hiperfrecuencia cuya anchura pueda ser inferior al kHz, permaneciendo su sintonización, no obstante, limitada. Estos láseres son objeto de inestabilidades inherentes a la propagación en las fibras, a saber, en concreto, unas variaciones de la fase óptica acumulada y que afectan directamente a la señal de hiperfrecuencia generada posteriormente (como consecuencia de las variaciones térmicas o de las tensiones que sufre la fibra).
- 10 S. J. Frisken "Transient Bragg reflection gratings in erbium-doped fiber amplifiers", Optics Letters Vol. 17, n.º 24, 15.12.1992 describe un filtro con amplificación formado por una fuente láser DFB que emite una onda óptica principal a 1535,9 nm, que está polarizada por un polarizador y un acoplador 50:50 para dividir dicha onda principal polarizada en dos ondas ópticas que interfieren en una fibra dopada con erbio. Según la invención, se propone un nuevo planteamiento para un láser de fibra de doble frecuencia en el que la red de Bragg fotoinscrita utilizada en las referencias anteriores, es una red holográfica, dinámica, que se adapta automáticamente a las ondas presentes. El proceso óptico implementado es un efecto no lineal de acoplamiento entre dos ondas que inscriben ellas mismas su red de difracción, por medio de un holograma por adición en el medio amplificador.
- 15 Más concretamente, la invención tiene por objeto un láser de fibra de doble frecuencia que incluye una fuente óptica láser que emite al menos una onda óptica principal a una primera longitud de onda, un medio amplificador de fibra caracterizado porque incluye unos medios para hacer que se interfieran dos ondas ópticas primarias procedentes de la onda óptica principal, de manera que se cree una red de difracción en el interior de dicho medio amplificador, difractándose así la onda óptica principal por dicha red de difracción creada, en una segunda onda óptica que emite a una segunda longitud de onda.
- 20 Según una variante de la invención, el medio amplificador incluye una fibra dopada de mantenimiento de la polarización.
- Según una variante de la invención, el láser de doble frecuencia incluye un acoplador que permite crear las dos ondas ópticas primarias a partir de la onda óptica principal.
- 25 Según una variante de la invención, el medio amplificador de fibra incluye un circulador óptico.
- Según una variante de la invención, el medio amplificador incluye una fibra óptica, una bomba óptica y un multiplexor de longitud de onda.
- Según una variante, el medio amplificador incluye una fibra óptica dopada que tiene dos fundas concéntricas o varios núcleos.
- 30 Según una variante de la invención, el láser de doble frecuencia incluye un circulador sobre la trayectoria de cada una de las ondas ópticas primarias, de manera que a la salida de dicho láser de doble frecuencia se recuperen, dos ondas ópticas secundarias.
- Según una variante de la invención, el medio amplificador incluye una fibra óptica, dos bombas ópticas y dos multiplexores de longitud de onda.
- 35 Según una variante de la invención, el láser de doble frecuencia incluye unos medios de reflexión de dicha onda principal de manera que la red de difracción se cree por interferencia entre dicha onda óptica principal y la onda reflejada de dicha onda óptica principal.
- Los medios de reflexión pueden incluir una componente de tipo espejo de Bragg o espejo metálico.
- Los medios de reflexión pueden incluir, asimismo, una fibra óptica que integra un extremo reflector enfrente de la
- 40 onda óptica principal.
- La invención se comprenderá mejor y otras ventajas se apreciarán más tras la lectura de la siguiente descripción y de las figuras adjuntas, entre las que:
- las figuras 1a, 1b y 1c esquematizan las etapas del proceso físico de mezcla de dos ondas en un medio amplificador;
 - 45 - la figura 2 ilustra la generación de la onda secundaria en el interior de la red de difracción creada en el láser de doble frecuencia de la invención;
 - la figura 3 ilustra un primer ejemplo de realización del láser de doble frecuencia según la invención;
 - la figura 4 ilustra un segundo ejemplo de láser de doble frecuencia según la invención;
 - la figura 5 ilustra un tercer ejemplo de láser de doble frecuencia según la invención;
 - 50 - la figura 6 ilustra una variante de la invención en la que una fibra incorpora una red.
- De manera general, el medio amplificador considerado en el marco de esta invención es una fibra óptica dopada, de mantenimiento de polarización, previamente colocada en inversión de población. Al estar la red de difracción creada, en esencia, adaptada a las ondas ópticas generadas, la estabilidad espectral del batimiento de hiperfrecuencia generada está garantizada. Al viajar las ondas ópticas en el mismo medio y al ser objeto de las mismas

perturbaciones, su batimiento deja presagiar una excelente pureza espectral. La frecuencia de la señal de microondas obtenida es susceptible de estar controlada por tensiones aplicadas sobre la fibra o por sintonización de longitud de onda de la fuente láser de excitación, sin ningún efecto negativo sobre su estabilidad.

5 La invención consiste en provocar una mezcla de ondas, entre dos ondas de frecuencia óptica denominadas primarias a la frecuencia ν_1 , en el interior de una fibra óptica amplificadora de mantenimiento de polarización, con el fin de generar una onda de frecuencia óptica denominada secundaria a una frecuencia $\nu_2 \neq \nu_1$. Este tipo de mezcla de ondas se describe, en concreto, en los siguientes artículos: A. Brignon, G. Feugnet, J.-P. Huignard, y J.-P. Pocholle, "Efficient degenerate four-wave mixing in a diode-pumped microchip Nd:YV04 amplifier", Opt. Lett. Vol. 20, N.º 6, 548-550 (1995), P. Yeh, "Two-wave mixing in nonlinear media", IEEE. J. Quantum Electr. Vol. 25, N.º 3, 484-518 (1989), S.T. Fiske, "Transient Bragg Reflection gratings in erbium-doped fiber amplifiers", Opt. Lett. Vol. 17, N.º 24, 1776-1778 (1992), B. Fischer, J.L. Zys-kind, J.W. Sulhoff y D.J. DiGiovanni, "Nonlinear wave mixing and induced gratings in erbium-doped fiber amplifiers", Opt. Lett. Vol. 18, N.º 24, 2108-2110 (1993).

15 Las figuras 1a, 1b y 1c esquematizan las etapas del proceso físico de mezcla de dos ondas en un medio amplificador. El medio amplificador es en este caso una fibra óptica dopada FOP previamente bombeada ópticamente con unos medios de bombeo P, para alcanzar la inversión de población entre sus niveles de energía, indicados como N1 y N2 (figura 1a). Si se considera que se han representado en la figura 1b, dos ondas ópticas con la misma frecuencia $\nu_1 = \frac{c}{\lambda_1}$ (donde c y λ_1 representan respectivamente la velocidad de la luz y la longitud de onda en el vacío), con el mismo estado de polarización, coherentes entre sí y con una longitud de coherencia L_{coh} al menos igual a la longitud L de la fibra. Estas dos ondas O_1 y O_1' se inyectan en el medio amplificador en sentidos opuestos e interfieren en él. De ello resulta una variación espacial de la intensidad total de la onda a la frecuencia ν_1 en el medio, que conduce a una saturación periódica (al nivel de las franjas brillantes) de la ganancia en el medio amplificador. La red de ganancia así generada permite la difracción y el acoplamiento de las dos ondas que la han creado. De este modo, como se ha representado en 1c, la onda O_1 se difracta sobre la red de ganancia que ha inscrito por interferencia con la onda O_1' para producir una onda difractada, O_2 , que se propaga en el mismo sentido
25 que la onda O_1' . Cabe destacar que el paso de la red de ganancia vale $\Lambda = \frac{\lambda_1}{2n} = \frac{c}{2n\nu_1}$ (donde n representa el índice de refracción del medio amplificador visto por las ondas O_1 y O_1').

El principio de la invención se basa en las consideraciones ilustradas en la figura 2, en la que el medio de interacción es una fibra amplificadora de mantenimiento de polarización, es decir altamente birrefringente.

30 Considerando \vec{e}_1 y \vec{e}_2 los dos ejes propios, De índices de refracción respectivos n_e y n_o , estando las dos ondas a la frecuencia ν_1 polarizadas según el eje \vec{e}_1 , su acoplamiento en el medio amplificador genera una red de ganancia coherente a lo largo de toda la longitud de la fibra. Este dispositivo puede considerarse como una cavidad láser DFB (por sus siglas en inglés de "distributed feed-back" realimentación distribuida) inyectada a la frecuencia ν_1 . Algunos de los fotones de emisión espontánea amplificada polarizados según el eje \vec{e}_2 pueden estar en el origen de una onda que oscila en esta cavidad. Esta debe verificar las condiciones de sintonización de fase de la DFB. Se trata de la onda O_2 (y la onda O_2') consideradas a continuación. El índice de refracción visto por esta onda es $n_o \neq n_e$, en consecuencia, su longitud de onda de sintonización λ_2 con la red DFB difiere de λ_1 (y su frecuencia óptica $\nu_2 = \frac{c}{\lambda_2}$ difiere de $\nu_1 = \frac{c}{\lambda_1}$, c y λ_i están tomadas al vacío). La relación de sintonización de fase se escribe $\Lambda = \frac{\lambda_1}{2n_e}$ para esta onda y $\Lambda = \frac{\lambda_2}{2n_o}$ para las ondas O_1 y O_1' . Se deduce entonces el valor de la frecuencia óptica de la onda O_2 en función del valor de la frecuencia de la onda O_1 : $\nu_2 = \frac{n_e(\nu_1)}{n_o(\nu_2)} \nu_1$.

40 Esta onda se beneficia de la ganancia media del medio amplificador, lo que permite presagiar unas intensidades de salida satisfactorias.

A partir de las ondas O_1 y O_2 , el batimiento entre ν_1 y ν_2 (obtenido por detección cuadrática en un fotodiodo rápido) puede utilizarse como oscilador local en los futuros radares. En efecto, una fibra comercial, cuya birrefringencia $\Delta n = n_e - n_o$ se sitúe en la gama $\Delta n \approx 10^{-3} - 10^{-4}$, provoca una separación $\Delta \lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ entre las dos longitudes de ondas generadas de aproximadamente $\Delta \lambda \approx 0,1 - 1 nm$; es decir, una diferencia de frecuencia $\Delta \nu = \nu_1 - \nu_2$ situándose en la ventana $\Delta \nu = \frac{\Delta n}{n_o} \nu_1 \approx 10 - 100 GHz$.

50 Además, este tipo de fuente de señales de microondas a la frecuencia $\Delta \nu$ es sintonizable. Se puede obtener una sintonización, bien ajustando el valor de la longitud de onda de inyección λ_1 , bien controlando el valor de la birrefringencia Δn (y esto mediante unas limitaciones térmicas o mecánicas en la fibra). Se puede considerar como una primera aproximación, que la dilatación de la red, es decir, la variación de su paso Λ en función de la temperatura puede despreciarse ante la dependencia de la birrefringencia con la temperatura. La contribución dominante de la temperatura es entonces una variación de birrefringencia de aproximadamente

$$\frac{1}{\Delta n} \frac{d\Delta n}{dt} \approx 10^{-3} - 10^{-4} / ^\circ C.$$

De este modo, para un batimiento $\Delta\nu \approx 40\text{GHz}$, una sintonización sobre un intervalo de $4\text{-}40\text{ MHz}/^\circ\text{C}$ es posible.

Además, el dispositivo presentado en el ámbito de esta invención es susceptible de presentar unas características excelentes en términos de pureza espectral. En efecto, cualquier perturbación en la onda a la frecuencia ν_1 la padece de manera idéntica la onda a la frecuencia ν_2 , siempre que su tiempo característico sea superior al tiempo de vida de los átomos excitados del medio amplificador. De este modo, las variaciones de fase debidas, por ejemplo, a las variaciones de longitud de la fibra (fluctuaciones térmicas) o bien también en la fuente óptica que suministra las ondas O_1 y $O_{1'}$, se integran mediante la red de ganancia.

A continuación, se describen diferentes ejemplos de realización:

10 Ejemplo 1

En la figura 3, se ilustra un primer ejemplo de realización de un láser de fibra de doble frecuencia.

El medio activo es una fibra óptica, de mantenimiento de polarización, dopada con erbio, 20. Esta, es bombeada por un diodo láser de fibra de 980 nm, 22, inyectado en la fibra por medio de un multiplexor en longitud de onda 21. El bombeo, tal y como se ha representado en la figura 3 es codireccional: la señal bombeada de 980 nm viaja en el mismo sentido que la onda O_1 inyectada a $1,5\ \mu\text{m}$. Cabe destacar que es posible utilizar un bombeo contradiereccional. El conjunto constituye el medio amplificador 2.

Según este ejemplo, el dispositivo fuente 1, está compuesto por un láser continuo monofrecuencia 10 que emite aproximadamente a $1,5\ \mu\text{m}$ polarizado rectilíneamente y por un acoplador óptico 11 que permite separar el haz emitido en dos haces (ondas O_1 y $O_{1'}$) distintos, pero con el mismo estado de polarización rectilínea y mutuamente coherentes.

Las ondas O_1 y $O_{1'}$ se inyectan en el amplificador 2. En el esquema de base de la figura 3, la onda O_1 atraviesa un circulador óptico 23 desde el punto A hasta el punto B, antes de su inyección en la fibra amplificadora tras pasar por el multiplexor 21. Ningún retorno es posible del punto B hacia el punto A. Las ondas $O_{1'}$ (que han atravesado la fibra e interferido con la onda O_1) y O_2 (difractada y amplificada a partir del ruido en la fibra) atraviesan el circulador óptico desde el punto B hasta el punto C donde están disponibles para generar el batimiento de microondas buscado. El aislador 3 impide el paso de la onda O_1 amplificada hacia el dispositivo fuente.

Segundo ejemplo de realización

Otra configuración consiste en un bombeo bidireccional ilustrado en la figura 4. Dos diodos láser de bombeo 221 y 222 y, por tanto, dos multiplexores 211 y 212 pueden utilizarse según la longitud de fibra 20 utilizada, para garantizar un bombeo uniforme a lo largo de toda su longitud; en este caso, se coloca un diodo en cada extremo de la fibra. Como norma general, un amplificador de fibra con bombeo codireccional tiene un factor de ruido optimizado y con bombeo contradiereccional, una potencia de salida elevada. Se utilizan, asimismo, dos circuladores ópticos 231 y 232. Un bombeo bidireccional puede beneficiarse de este modo de estas dos ventajas. Hay que optimizar el esquema del bombeo óptico para cada arquitectura de láser de doble frecuencia implementada, de manera que se maximicen las potencias ópticas de las ondas láser generadas a $1,5\ \mu\text{m}$.

Cabe destacar que el dispositivo fuente, representado en la figura 3, está compuesto por un láser continuo monofrecuencia que emite aproximadamente a $1,5\ \mu\text{m}$ polarizado rectilíneamente y por un acoplador óptico que permite separar el haz emitido en dos haces (ondas O_1 y $O_{1'}$) distintos, pero con el mismo estado de polarización rectilínea y mutuamente coherentes. Es posible utilizar un láser no polarizado asociado con un controlador de polarización 12 de fibra (como se ilustra en la figura 4), un dispositivo que permite obtener la polarización deseada a partir de un estado de polarización cualquiera.

Según esta variante, es posible disponer de dos salidas (puntos C y C'), al utilizar dos circuladores ópticos y las ondas O_2 y $O_{2'}$ difractadas en las dos direcciones por la fibra.

El principio de la invención se ha ilustrado mediante un ejemplo en el que se usa una fibra dopada con erbio. Cabe destacar que este amplificador puede sustituirse por cualquier otro tipo de fibra amplificadora. En efecto, se puede contemplar la mezcla de dos ondas para la realización de un láser de doble frecuencia, de manera más general, en el interior de cualquier fibra dopada mediante unos iones de tierras-raras. Tales fibras se encuentran en el comercio, están dopadas con iterbio, neodimio, samario o tulio o bien codopadas con erbio e iterbio, tulio y holmio o erbio e iterbio. Por supuesto, las longitudes de onda de absorción (que determinan las de bombeo óptico) y de emisión láser varían en función del amplificador usado. Además, la concentración del dopante usado determina la forma y la anchura del perfil de ganancia del amplificador. Así, por ejemplo, una fibra dopada con erbio es, con frecuencia, para más exactitud una fibra de silicio (SiO_2) dopada con Ge y dopada con Er, es decir, $\text{Ge/SiO}_2\text{:Er}$, pero un dopado $\text{Al/P/SiO}_2\text{:Er}$ permite obtener un espectro de ganancia más amplio y plano cuanto más elevada sea la concentración de aluminio.

El bombeo óptico descrito anteriormente se efectúa mediante un diodo láser de 980 nm. Se pueden usar otros láseres de bombeo en el caso de un dopado de la fibra amplificadora con un ion de tierras raras distinto al erbio. Cabe destacar que incluso en el caso de una fibra dopada con erbio, es posible usar otras transiciones de absorción (de aproximadamente 810 nm o de 1480 nm). No obstante, 980 nm y 1480 nm son las dos longitudes de onda que mejor se adaptan: unos diodos láser semiconductores están disponibles a estas longitudes de onda (de AlGaAs para 980 nm y de InGaAsP para 1480 nm). Por otra parte, cabe prever una transposición de las propiedades de los amplificadores de fibra dopada con erbio en el caso de la presente invención: un bombeo de 980 nm permite una inversión de población casi total y una relación óptima de señal sobre ruido, un bombeo de 1480 nm permite unas potencias de bombeo y de saturación más elevadas (por tanto, más ganancia).

En los ejemplos de realización descritos anteriormente, el haz láser de 980 nm está acoplado en el núcleo de la fibra dopada, por medio de un multiplexor de longitudes de onda de la fibra.

Son posibles otras arquitecturas de bombeo óptico, de las cuales se ofrecen algunos ejemplos. Cabe destacar, no obstante, que se trata de procedimientos típicamente reservados a los amplificadores de fibra de gran potencia, en los que es necesario inyectar unos haces de bombeo muy intensos (diodos láser de potencia o redes de diodos láser) sin dañar el núcleo de la fibra. La primera posibilidad consiste en usar unas fibras dopadas que tengan dos fundas concéntricas o bien varios núcleos. En ese caso, la onda de bombeo está acoplada en la funda suplementaria o en un núcleo suplementario, de área lo suficientemente grande como para evitar cualquier daño.

Una segunda posibilidad es el uso de una fibra dopada cuya funda tenga un hueco en V ("ranura en V"). El bombeo se inyecta entonces a través de la ranura de la fibra y se propaga por reflexiones en el interior de la funda, cruzando el núcleo dopado en cada reflexión como se describe en la patente de los EE. UU. 6.529.657: "Angle selective side-pumping of fiber amplifiers and lasers", L. Goldberg (Fairfax, VA), M. LeFlohic (Saint Quoy Perros, FR), Keopsys Inc. (Fairfax, VA). 4 de marzo de 2003.

En el tipo de arquitectura de la presente invención, la fuente láser (a 1,5 μm) es un láser de estado sólido bombeado por un diodo, de anchura espectral muy fina, con el fin de que las ondas que interfieren en la fibra sean coherentes a lo largo de toda la longitud de su propagación. La longitud máxima de la fibra amplificadora utilizada en el marco de la presente invención es aproximadamente la de las de los amplificadores de fibra, es decir, una veintena de metros. Una fuente láser coherente sobre 20 m, tiene, por tanto, una anchura espectral próxima a los 15 MHz, (típicamente diodos láser semiconductores de tipo DFB comerciales) tiene calidad suficiente como para obtener el funcionamiento de doble frecuencia.

30 Tercer ejemplo de realización:

En la figura 5, se ha representado una arquitectura de un láser de doble frecuencia, inyectado por un único extremo de la fibra. En esta configuración, la red de ganancia se crea por la interferencia entre la onda O_1 , procedente del láser fuente y la reflexión de la onda O_1 sobre un espejo 24 (de coeficiente de reflexión R) colocado en el otro extremo de la fibra dopada. El espejo puede ser, bien el propio extremo de la fibra ("hendido" en el ángulo deseado en función de la reflexión deseada), bien un componente (espejo de Bragg o metálico) conectado o soldado al final de la fibra.

Para un valor g_0 (ganancia de señal pequeña del amplificador) fijo, la eficacia de la red de ganancia está directamente vinculada a la relación de las potencias entre las ondas que interfieren (habida cuenta de las pérdidas del multiplexor): $P_B'/P_B = R e^{g_0 L}$ (P_B' : potencia inyectada en el punto B; P_B : potencia de la onda reflejada en el punto B').

Además de la sencillez de su implementación, esta arquitectura permite el ahorro de componentes (acoplador y aislador o circulador) y presenta la ventaja de ser altamente insensible a las variaciones de fase padecidas por la onda antes de su inyección en el amplificador.

Es posible combinar la red de ganancia dinámica (por mezcla de ondas en la fibra amplificadora), con la inscripción de un espejo de Bragg fijo (mediante unas técnicas UV estándar).

El láser de doble frecuencia resultante es entonces del tipo que se presenta en la figura 6. La sección de fibra en la que está inscrita la red fija 201 (de aproximadamente unos centímetros de largo) puede ser, bien el extremo de la fibra dopada de mantenimiento de polarización, bien un tramo de fibra estándar de mantenimiento de polarización cuyos valores de los índices ordinario y extraordinario coinciden perfectamente con los de la fibra dopada. La red dinámica nace en la fibra dopada con las condiciones de sintonización de fase impuestas por la presencia del espejo de Bragg fijo.

La ventaja de esta configuración es que solo es necesario un diodo de bombeo para el funcionamiento del láser de doble frecuencia, se suprime la fuente de inyección a 1,5 μm . El dispositivo funciona como un láser DFB de gran longitud (eventualmente del orden de unos metros), un componente prometedor en términos de ganancia láser y de selectividad espectral y cuya fabricación por inscripción UV no es viable.

ES 2 653 196 T3

Cabe destacar que en esta configuración no parece que se pueda excluir la supresión del multiplexor también, bombeando en un sentido y recogiendo la señal láser a 1,5 μm en sentido opuesto.

REIVINDICACIONES

1. Láser de fibra de doble frecuencia que incluye una fuente óptica láser (1) que emite al menos una onda óptica polarizada principal a una primera longitud de onda (λ_1), un medio amplificador de fibra (2), y
- 5 unos medios para hacer que interfieran (11, 24, 201) dos ondas ópticas primarias (O_1, O_1') procedentes de la onda óptica polarizada principal, teniendo las dos ondas ópticas primarias:
- la misma frecuencia óptica $\nu_1 = \frac{c}{\lambda_1}$.
 - el mismo estado de polarización, estando dicho estado polarizado según un eje propio \vec{e}_1 , \vec{e}_1' y \vec{e}_2 siendo los dos ejes propios, unos índices de refracción respectivos n_e y n_o de la fibra óptica dopada
- 10 - incluyendo dicho medio amplificador una fibra óptica dopada, de mantenimiento de polarización y previamente bombeada ópticamente para alcanzar una inversión de población entre dos niveles de energía, siendo dicha fibra altamente birrefringente con una birrefringencia $\Delta n = n_e - n_o$;
- creando el acoplamiento de las dos ondas ópticas primarias en el medio amplificador una red de difracción en el interior de dicho medio amplificador de fibra, y así una red de ganancia coherente a lo largo de toda la
- 15 longitud de la fibra y una cavidad láser DFB a la frecuencia ν_2 según el eje de la fibra correspondiente al índice de refracción n_o , inyectándose la cavidad láser DFB a la frecuencia ν_1 ,
- siendo algunos de los fotones de emisión espontánea amplificada polarizados según el eje \vec{e}_2 el origen de una segunda onda oscilante (O_2, O_2') a la frecuencia óptica ν_2 correspondiente a la longitud de onda λ_2 y
- definida por la siguiente ecuación: $\nu_2 = \frac{n_e(\nu_1)}{n_o(\nu_2)} \nu_1$,
- 20 respondiendo el paso de la red a las dos ecuaciones:
- $$\Lambda = \lambda_1/2n_e \text{ y } \Lambda = \lambda_2/2n_o,$$
- emitiendo dicho láser de doble frecuencia a la salida de dicho medio amplificador a las frecuencias ópticas ν_1 y ν_2 , y
- comprendiendo dicho láser de doble frecuencia: un circulador óptico (23) que está atravesado por una de las
- 25 dos ondas ópticas primarias (O_1') y por la segunda onda oscilante (O_2), de manera que se genere el batimiento entre dichas ondas (O_1', O_2) de frecuencia ν_1 y ν_2 .
2. Láser de fibra de doble frecuencia según la reivindicación 1, **caracterizado porque** incluye un acoplador que permite crear las dos ondas ópticas primarias a partir de la onda óptica principal (O_1, O_1').
3. Láser de fibra de doble frecuencia según una de las reivindicaciones 1 a 2, **caracterizado porque** el medio amplificador (2) incluye una fibra óptica (20), una bomba óptica (22) y un multiplexor de longitud de onda (21).
- 30 4. Láser de fibra de doble frecuencia según una de las reivindicaciones 1 a 3, **caracterizado porque** el medio amplificador (2) incluye una fibra óptica dopada que tiene dos fundas concéntricas o varios núcleos.
5. Láser de fibra de doble frecuencia según una de las reivindicaciones 1 a 3, **caracterizado porque** incluye sobre el trayecto de cada una de las ondas ópticas primarias un circulador (231, 232), de manera que a la salida de dicho
- 35 láser de doble frecuencia se recuperen, dos ondas ópticas secundarias (O_2, O_2').
6. Láser de fibra de doble frecuencia según la reivindicación 4, **caracterizado porque** el medio amplificador (2) incluye una fibra óptica (20), dos bombas ópticas (221, 222) y dos multiplexores en longitud de onda (211, 212).
7. Láser de fibra de doble frecuencia según la reivindicación 1, **caracterizado porque** incluye unos medios de reflexión (24) de dicha onda principal, de manera que se cree la red de difracción por interferencia entre dicha onda
- 40 óptica principal y la onda reflejada de dicha onda óptica principal.
8. Láser de fibra de doble frecuencia según la reivindicación 7, **caracterizado porque** los medios de reflexión incluyen un componente de tipo espejo de Bragg, de fibra o no o un espejo metálico.
9. Láser de fibra de doble frecuencia según la reivindicación 6, **caracterizado porque** el medio amplificador incluye una fibra óptica que integra un extremo reflector (201) frente a la onda óptica principal.

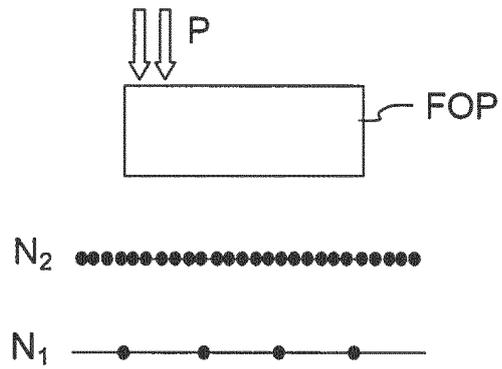


FIG.1a

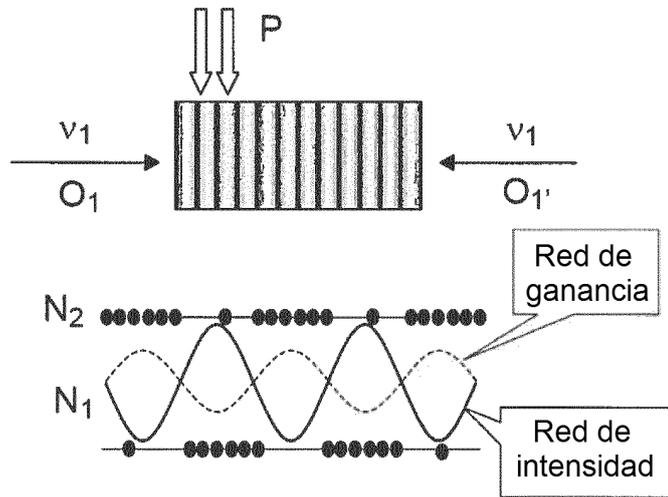


FIG.1b

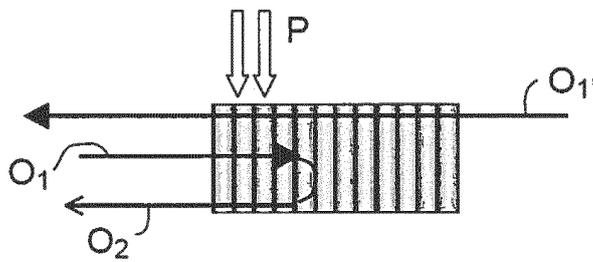


FIG.1c

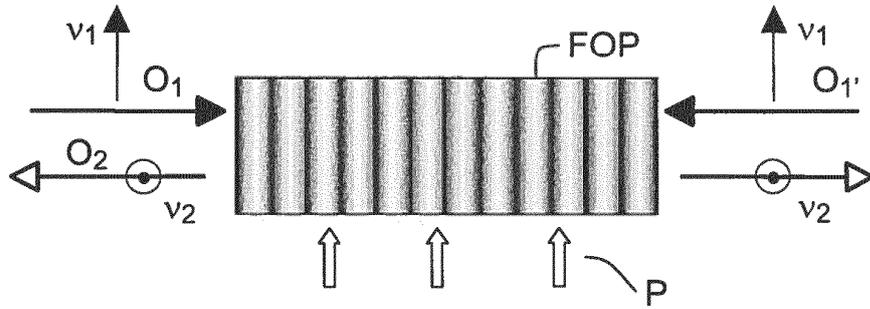
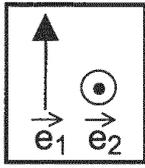


FIG.2

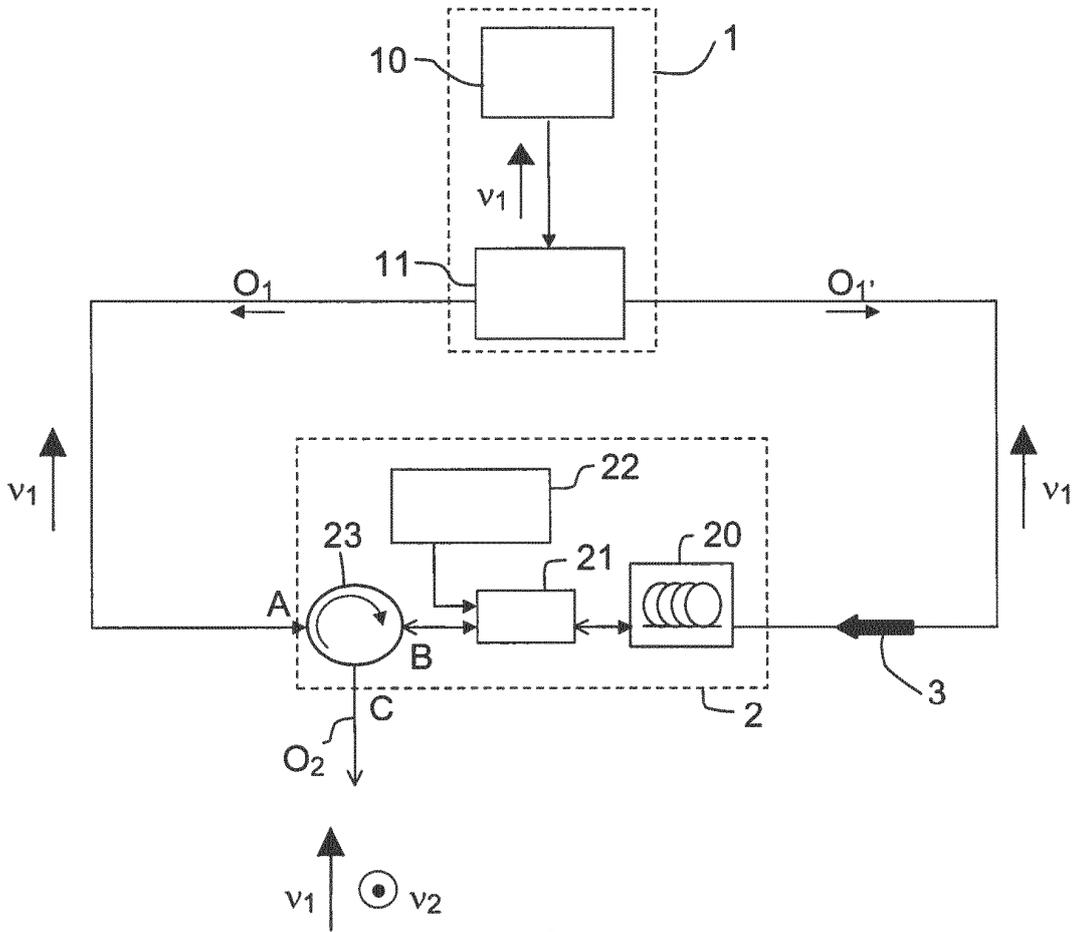


FIG.3

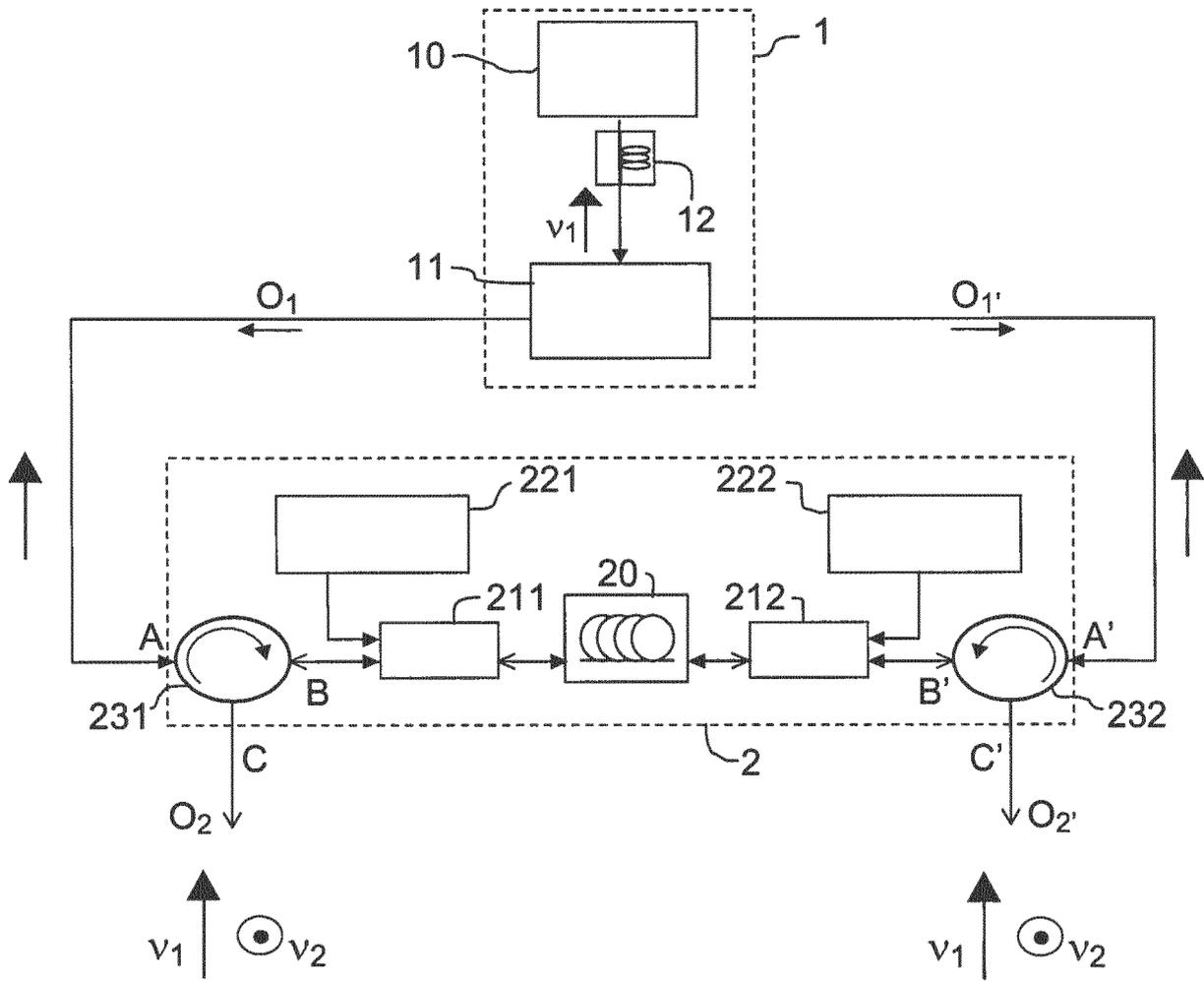


FIG.4

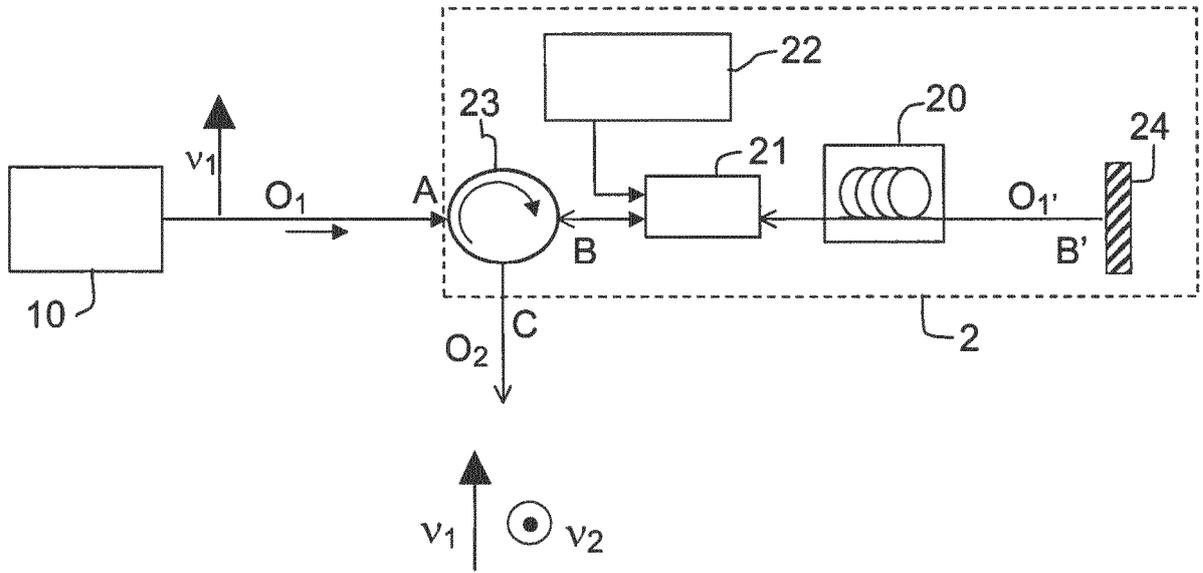


FIG.5

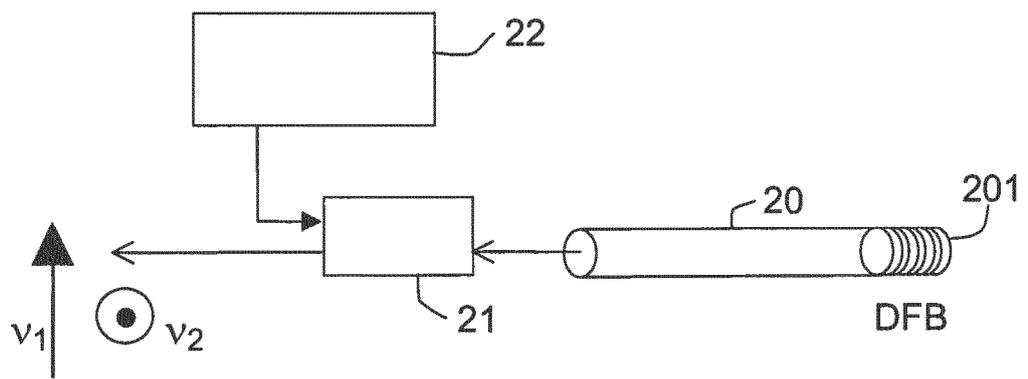


FIG.6