



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 366 447**

51 Int. Cl.:
H01S 3/067 (2006.01)
G02B 6/26 (2006.01)
G02B 6/14 (2006.01)
G02B 6/036 (2006.01)
G01S 7/481 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **06796097 .1**
96 Fecha de presentación : **18.09.2006**
97 Número de publicación de la solicitud: **1941590**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **09.07.2008**

54 Título: **Fuente de láser infrarrojo despolarizada.**

30 Prioridad: **02.10.2005 IL 171251**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
20.10.2011

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
20.10.2011

73 Titular/es:
ELBIT SYSTEMS ELECTRO-OPTICAL ELOP Ltd.
P.O. Box 1165
76111 Rehovot, IL

72 Inventor/es: **Sacks, Zachary y**
Schiffer, Zeev

74 Agente: **Carpintero López, Mario**

ES 2 366 447 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

Fuente de láser infrarrojo despolarizada

Campo de la invención

5 La presente invención se refiere a dispositivos láser y más particularmente, a dispositivos láser para producir longitudes de onda en la Banda IV (infrarrojo).

Antecedentes de la invención

10 Los láseres para su uso en el intervalo de la Banda I de longitudes de onda son adecuados para muchas aplicaciones tales como detección remota, radar de láser, contramedidas por infrarrojo dirigidas, y otras. Normalmente, los láseres que son capaces de trabajar en el intervalo de la Banda I son láseres de tipo *bulk* hechos a partir de cristales. Sería ventajoso disponer de capacidad de láser de Banda I usando láseres de fibra en lugar de láseres de tipo *bulk*, ya que se conoce que los láseres de fibra son más fáciles de fabricar, más eficientes, más estables, más robustos, y tienen un haz de salida estable y bien definido. No obstante, se ha pensado que tales láseres de fibra son altamente ineficientes o que es imposible que emitan luz coherente a las longitudes de onda requeridas debido a una baja ganancia, reabsorción por el ión activo, o absorción del material huésped.

15 Además, los láseres para su uso en el intervalo de la Banda IV de longitudes de onda son asimismo útiles para muchas aplicaciones. Por ejemplo, las contramedidas de IR directas (DIRCM), son sistemas que activan unos medios de interferencia intencionada direccional contra un misil que se acerca. Un ejemplo de un sistema de DIRCM se describe en mayor detalle en el documento WO 2004/109323.

20 El documento WO 2004/109323 concierne a un sistema de contramedidas de IR directas que incluye un láser de fibra que puede producir longitudes de onda en la Banda IV. El láser de fibra comprende un oscilador de láser despolarizado, un amplificador, un polarizador y dispositivos de conversión de frecuencia.

25 El documento EP 1 309 113 da a conocer un sistema de transmisión óptica que emplea un amplificador de Raman que incluye una fuente de bombeo de Raman para introducir luz de bombeo despolarizada en el interior de la fibra. La fuente de bombeo incluye una fuente óptica que genera una señal de bombeo óptica polarizada, un divisor óptico que divide la señal de bombeo óptica a partir de la fuente óptica en el interior de dos partes de bombeo, un dispositivo de retardo que retarda partes de bombeo relativas entre sí y un combinador de haz que recibe y que combina las partes de bombeo para formar la luz de bombeo, en la que la luz de bombeo incluye energía óptica en al menos dos estados de polarización ortogonal.

30 Una fuente ideal para producir una energía de Banda IV para las DIRCM u otras aplicaciones sería un láser de fibra que tuviera una gran energía de pulso. No obstante, los láseres de fibra con altas potencias (CW) y energías de pulso moderadas (mJ) (tales como, por ejemplo, láseres de fibra con doble revestimiento) a longitudes de onda en la Banda IV no existen o no son prácticos para aplicaciones de ingeniería. Específicamente, la Banda IV se genera convirtiendo una longitud de onda disponible. Por ejemplo, un oscilador paramétrico óptico (OPO) basado en niobato de litio polarizado de manera periódica (PPLN) puede convertir la longitud de onda de salida de un láser de fibra de Yb de 1 μm a 4 μm con un rendimiento de aproximadamente un 10%. Para obtener una salida de 4–5 W, debe usarse un láser 40–50 W. No obstante, las características de la fibra (tales como una fibra de Yb de 20/400) establecen una longitud de fibra de aproximadamente 8 m, lo que puede dar como resultado efectos no lineales tales como dispersión de Brillouin estimulada (SBS), dispersión de Raman estimulada (SRS), y automodulación de fase (SPM, *self-phase modulation*) si se generan pulsos de alta energía (del nivel de mJ). Además, el OPO no podrá manejar la generación de 4 W a 4 μm , debido particularmente a que el PPLN absorbe esta longitud de onda, lo que da como resultado altos efectos térmicos e inestabilidad. Adicionalmente, la conversión de frecuencia generalmente requiere fuentes de láser polarizado, que son difíciles y costosas de montar usando componentes de mantenimiento de polarización no convencionales.

Sumario de la invención

45 De acuerdo con un aspecto de la presente invención se proporciona un láser para producir longitudes de onda en la banda IV de infrarrojo. Dicho láser comprende: un oscilador de láser despolarizado para producir luz despolarizada en un primer estado ortogonal y en un segundo estado ortogonal; al menos un amplificador de fibra para amplificar dicha luz despolarizada; un polarizador para separar dicha luz despolarizada amplificada en un primer estado ortogonal y en un segundo estado ortogonal; un primer dispositivo de conversión de frecuencia para convertir dicha luz despolarizada amplificada en dicho primer estado ortogonal a una longitud de onda en la banda IV; y un segundo dispositivo de conversión de frecuencia para convertir dicha luz despolarizada amplificada en dicho segundo estado ortogonal a una longitud de onda en la banda IV, en la que dicho oscilador de láser despolarizado es un diodo láser, despolarizándose la luz de salida de dicho diodo láser mediante un despolarizador, caracterizado porque dicho despolarizador comprende: un primer divisor de haz de polarización que tiene una fibra de entrada y dos fibras de salida; y un segundo divisor de haz de polarización que tiene dos fibras de entrada y una fibra de salida, en el que dichas dos fibras de entrada de dicho segundo divisor de haz de polarización se empalman con dichas dos fibras de salida de dicho primer divisor de haz de polarización formando una primera trayectoria y una segunda trayectoria, en

el que una diferencia de longitudes entre dichas trayectorias primera y segunda es más larga que una longitud de coherencia de dicho diodo láser.

De acuerdo con otro aspecto de la presente invención se proporciona un láser para producir longitudes de onda en la banda IV de infrarrojo, en el que dicho primer divisor de haz de polarización es un divisor que mantiene una polarización de 50/50.

De acuerdo con otro aspecto más de la presente invención se proporciona un láser para producir longitudes de onda en la banda IV de infrarrojo, en el que dicho al menos un amplificador incluye amplificadores múltiples.

De acuerdo con otro aspecto más de la presente invención se proporciona un láser para producir longitudes de onda en la banda IV de infrarrojo, en el que dichos primer y segundo dispositivos de conversión de frecuencia se seleccionan del grupo que consiste en: un ZGP OPO; OP-GaAS OPO; un OP-GaAS OPO/OPG; un PPLN OPO; un PPMgOILN OPO; y un OPG/OPA.

De acuerdo con otro aspecto más de la presente invención se proporciona un láser para producir longitudes de onda en la banda IV de infrarrojo, en el que dicho al menos un amplificador se selecciona del grupo que consiste en: Yb: sílice; Ho: sílice; Yb, Ho: sílice; Yb, Tm: sílice; Tm, Ho: sílice; Yb, Ho: sílice, Tm: ZBLAN; Yb: ZBLAN; Ho: ZBLAN; Er: ZBLAN; Yb, Ho: ZBLAN; Yb, Tm: ZBLAN; Tm, Ho: ZBLAN; Yb, Ho: ZBLAN, Tm: fluoruro; Yb: fluoruro; Ho: fluoruro; Nd: fluoruro; Er: fluoruro; Yb, Ho: fluoruro; Yb, Tm: fluoruro; Tm, Ho: fluoruro; Yb, Ho: fluoruro, Tm: calcogenuro; Yb: calcogenuro; Ho: calcogenuro; Nd: calcogenuro; Er: calcogenuro; Yb, Ho: calcogenuro; Yb, Tm: calcogenuro; Tm, Ho: calcogenuro; Pr: calcogenuro; Dy: calcogenuro; Tb: calcogenuro; e Yb, Ho: calcogenuro.

A menos que se defina de otro modo, todos los términos técnicos y científicos usados en la presente memoria tienen el mismo significado tal como comúnmente entendería un experto en la técnica a la que pertenece esta invención. A pesar de que pueden usarse métodos y materiales similares o equivalentes a los descritos en la presente memoria en la práctica o la realización de pruebas de la presente invención, a continuación se describen métodos y materiales adecuados. Además, los materiales, métodos, y ejemplos son sólo ilustrativos y no pretenden tener un carácter limitante.

Breve descripción de los dibujos

La invención se describe en la presente memoria, sólo a modo de ejemplo, con referencia a los dibujos adjuntos. Haciendo ahora referencia específica en detalle a los dibujos, se enfatiza que los detalles mostrados son sólo a modo de ejemplo y para realizar una discusión ilustrativa de las realizaciones preferidas de la presente invención, y se presentan con el objeto de proporcionar lo que se cree que es la descripción más útil y fácilmente comprensible de los principios y aspectos conceptuales de la invención. A este respecto, no se pretende mostrar detalles estructurales de la invención en más detalle del necesario para una comprensión fundamental de la invención, haciendo la descripción tomada junto con los dibujos evidente a los expertos en la técnica el cómo pueden realizarse en la práctica las diversas formas de la invención.

En los dibujos:

la figura 1 es una ilustración esquemática de un láser de fibra para su uso en el intervalo de la Banda I; la figura 2 es una ilustración de una configuración de un sistema de láser de fibra que está diseñado para superar las limitaciones implicadas en la producción de un láser de fibra de alta energía en la Banda IV; las figuras 3A y 3B son ilustraciones esquemáticas de despolarizadores; las figuras 4A y 4B son ilustraciones esquemáticas de fuentes despolarizadas; la figura 5 es una ilustración de una primera configuración de un láser de fibra que fue sometido a prueba; la figura 6 es una ilustración de una segunda configuración de un láser de fibra que fue sometido a prueba; la figura 7 es una ilustración de una tercera configuración de un láser de fibra que fue sometido a prueba; la figura 8 es una ilustración gráfica de una curva de rendimiento, que muestra el rendimiento del láser de fibra de la figura 5; la figura 9 es una ilustración gráfica de longitudes de onda medidas y simuladas a diversas potencias, usando el láser de fibra de la figura 6; la figura 10 es una ilustración gráfica de una curva de rendimiento, que muestra el rendimiento del láser de fibra de la figura 7; la figura 11 es una ilustración de unas curvas de rendimiento para una emisión de luz coherente de alta longitud de onda; la figura 12 es una ilustración de una potencia de salida medida y simulada a unas potencias de emisión diferentes para una salida de longitud de onda de 2.100 nm; la figura 13 es una ilustración de la estabilidad de láser mientras se hace funcionar con una potencia de bombeo alta; las figuras 14A–14D son ilustraciones gráficas que muestran rendimientos de láser a 2.095 nm para cuatro concentraciones diferentes en función de la longitud de fibra y de la reflectancia especular; la figura 15 es una ilustración gráfica de potencias de láser de una fibra con unos parámetros predefinidos

específicos;

la figura 16 es una ilustración esquemática de un analizador de polarización;

las figuras 17A y 17B son ilustraciones gráficas de trazas y espectros temporales, respectivamente, de un diodo láser antes y después de la despolarización;

5 la figura 18 es una ilustración gráfica de resultados de laboratorio para un láser de fibra despolarizado que produce Banda IV;

la figura 19A es una ilustración esquemática de un láser de fibra para su uso en el intervalo de la Banda I;

las figuras 19B y 19C son ilustraciones esquemáticas que muestran las trayectorias de la energía de bombeo y de la señal de láser, respectivamente, de acuerdo con la realización mostrada en la figura 19A;

10 la figura 20 es una ilustración esquemática de un sistema para el reacoplamiento de luz de alta potencia; y

la figura 21 es una ilustración esquemática de una fibra empalmada a partir del sistema de la figura 20.

Descripción de las realizaciones preferidas

Se tratan láseres de fibra para diversas aplicaciones. Se trata un láser de fibra pulsado o de onda continua que puede usarse para generar una radiación en la banda de 2,08–2,3 μm, y de un láser de fibra pulsado despolarizado y/o de alta potencia que puede usarse para generar una radiación en el intervalo de la Banda IV.

15 Los principios y el funcionamiento de los láseres de fibra pueden entenderse mejor con referencia a los dibujos y las descripciones adjuntas.

Los principios y el funcionamiento de los láseres de fibra pueden entenderse mejor con referencia a los dibujos y las descripciones adjuntas.

Antes de explicar en detalle al menos una realización de la invención, ha de entenderse que la invención no está limitada en su aplicación a los detalles de construcción y la disposición de los componentes expuestos en la siguiente descripción o ilustrados en los dibujos. La invención es capaz de otras realizaciones o de practicarse o llevarse a cabo de diversas formas. Asimismo, ha de entenderse que el conjunto de frases hechas y locuciones y la terminología empleada en la presente memoria tienen una finalidad descriptiva y no deben entenderse como limitantes.

20 Antes de explicar en detalle al menos una realización de la invención, ha de entenderse que la invención no está limitada en su aplicación a los detalles de construcción y la disposición de los componentes expuestos en la siguiente descripción o ilustrados en los dibujos. La invención es capaz de otras realizaciones o de practicarse o llevarse a cabo de diversas formas. Asimismo, ha de entenderse que el conjunto de frases hechas y locuciones y la terminología empleada en la presente memoria tienen una finalidad descriptiva y no deben entenderse como limitantes.

Láser de fibra de onda continua en la banda de 2,08–2,3 μm

25 La longitud de onda de la emisión de luz coherente depende de la concentración de dopantes, las reflectividades especulares, la absorción de fibra de fondo, y la longitud de fibra. La ganancia en un láser de fibra viene dada por la ecuación 1,

$$g_{tot} = \int_0^L g(z, \lambda) dz = \int_0^L [N_2(z) \sigma_s^e(\lambda) - N_1(z) \sigma_s^a(\lambda)] dz$$

Ec. 1

30 en la que g_{tot} es la ganancia total en la fibra, $g(z, \lambda)$ es la ganancia en la posición z y a la longitud de onda λ , L es la longitud de la fibra, N_2 es la población del nivel de emisión de luz coherente superior, N_1 es la población del nivel de emisión de luz coherente inferior, y σ^e y σ^a son las secciones eficaces de emisión y de absorción a las longitudes de onda de emisión de luz coherente. Debe observarse que los términos σ incluyen de manera implícita la integral de solapamiento del modo de emisión de luz coherente y el núcleo de la fibra, Γ , es decir,

$$\sigma = \Gamma \sigma(ion)$$

35 en la que σ es σ^e o σ^a de la ecuación 1, $\sigma(ion)$ es la sección eficaz del material de emisión de luz coherente (normalmente un ión), y Γ es la integral de solapamiento.

La ecuación 1 puede convertirse a una forma algebraica usando las ecuaciones 2 y 3 para eliminar la integral.

$$N_{tot} = N_1 + N_2$$

Ec. 2

$$n_{ave} = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{N_2(z)}{N_{tot}} dz$$

Ec. 3

40 Después de realizar esta sustitución, la ecuación 4 muestra la ganancia total como una función de la inversión promedio y las secciones eficaces de fibra.

$$g_{tot} = N_{tot} \cdot L \cdot [n_{ave} (\sigma_s^e(\lambda) + \sigma_s^a(\lambda)) - \sigma_s^a(\lambda)]$$

Ec. 4

Puede apreciarse fácilmente que la ganancia de fibra depende fuertemente de la sección eficaz de absorción en el

último término de la ecuación 4. La inversión sólo da lugar al componente multiplicado por n_{ave} , que puede ser normalmente inferior a un pequeño porcentaje. El espectro de ganancia puede cambiarse en consecuencia aumentando la concentración de dopantes o aumentando la longitud de fibra.

5 La longitud de onda de la emisión de luz coherente puede determinarse ahora usando la ecuación 4 para la ganancia de la fibra. El láser funcionará cuando la ganancia de ida y vuelta sea igual a la pérdida tal como se muestra en la ecuación 5.

$$R_1 R_2 \exp \left\{ 2 \cdot \int_0^L g(\lambda, z) dz - 2\alpha L \right\} = 1$$

Ec. 5

10 En este caso, R_1 y R_2 son las reflectividades de las cavidades especulares, y α es la longitud de fondo que depende de la pérdida en la cavidad. Después de la sustitución de la ecuación 1 y 4 en la ecuación 5, obtenemos la ecuación 6.

$$n_{ave} = \frac{1}{N_{tot}} \cdot \frac{1}{\sigma_s^e + \sigma_s^a} \cdot \left[\alpha - \frac{1}{2L} \ln(R_1 R_2) + \sigma_s^a N_{tot} \right]$$

Ec. 6

15 Esta ecuación proporciona la inversión promedio en el láser en función de la longitud de onda, las reflectividades especulares, la pérdida en la fibra de fondo, y la concentración de dopantes. La longitud de onda a la que se emite luz coherente es la longitud de onda en la que se minimiza n_{ave} , ya que ésta es la primera longitud de onda que alcanza el valor umbral.

20 Para explicar la ecuación 6, la longitud de onda de la emisión de luz coherente viene determinada por cuántos átomos (u otros elementos de emisión de luz coherente tales como moléculas, etc.) ve un fotón. Cada átomo producirá una absorción y hará que el espectro se desplace. Por ejemplo, en fibras de Yb: sílice para longitudes de onda más largas que 1040 nm, la pendiente de la ganancia es mucho más alta que la pendiente de la pérdida. La inversión de onda continua permanecerá aproximadamente igual sin importar la intensidad con la que se bombee el láser en funcionamiento de CW. La inversión es relativamente constante. No obstante, el término de pérdida puede alterarse dramáticamente para desplazar la longitud de onda de la emisión de luz coherente a longitudes de onda más largas. Si se aumenta la concentración de dopantes, o se aumenta la vida útil en la cavidad aumentando las reflectividades especulares, o se aumenta la pérdida en la fibra intrínseca, el espectro se desplazará a longitudes de onda más largas. Una fibra de doble revestimiento permite una concentración de dopantes lo bastante alta como para obtener longitudes de onda largas. Los expertos en la técnica observarán que la fibra puede también tener múltiples revestimientos, tales como fibra de triple revestimiento, u otras variaciones, tales como núcleo de índice aumentado para permitir un funcionamiento de modo único que usa bobinado.

30 En consecuencia, para hacer la longitud de onda más larga, la longitud de fibra puede aumentarse. La longitud no puede aumentarse sin límite. Para un funcionamiento eficiente, toda la fibra debe invertirse de modo que la señal de emisión de luz coherente no se reabsorbe por la sección de fibra sin invertir. Se cree que esta reabsorción hace también que la señal de láser pulse, y una verdadera emisión de luz coherente de CW no se conseguirá nunca.

35 Se hace ahora referencia a la figura 1, que es una ilustración esquemática de un láser 10 de fibra. El láser 10 de fibra tiene tres componentes principales: una cavidad 12 de láser, una fuente 14 de energía y un mecanismo 16 de acoplamiento.

40 La cavidad 12 de láser incluye una fibra 13 óptica activa y dos redes 22 y 24 de Bragg de fibra (FBG), generalmente en fibras no activas, que sirven como el reflector alto de cavidad y el acoplador de salida, respectivamente. La luz láser emerge del punto 20 de salida, que puede ser un conector escindido en ángulo. El punto de entrada de potencia de bombeo puede estar en cualquiera de los extremo de la fibra 13 óptica o en cualquier punto a lo largo de la fibra 13 óptica, incluyendo la fibra activa, la fibra que contiene las FBG 22 y 24, o una fibra adicional conectada ópticamente a la fibra 13 óptica. También pueden seleccionarse múltiples puntos de entrada de potencia de bombeo. Los expertos en la técnica deberían entender que en un láser de doble revestimiento, tales puntos de entrada están diseñados para suministrar potencia de bombeo al interior de un revestimiento exterior, en el que el extremo 18 de entrada/salida de emisión de luz coherente está presente en un revestimiento interior y que el extremo 20 de reflexión está presente sólo en un núcleo definido por el núcleo interior. Un primer reflector 22 se coloca en el extremo 18 de entrada/salida, y un segundo reflector 24 se coloca en el extremo 20 de reflexión. En una realización preferida, la fibra 13 óptica es una fibra de Tm: sílice, tal como se conoce comúnmente en la técnica. Más específicamente, la fibra 13 óptica puede ser una fibra de Tm: sílice de doble revestimiento. En realizaciones alternativas, la fibra 13 óptica es cualquier fibra de doble revestimiento tal como, por ejemplo, Tm: sílice; Ho: sílice; Yb, Ho: sílice; Er, Yb, Tm: sílice; Er, Tm: sílice; Yb, Tm: sílice; Tm, Ho: sílice; Er, Yb, Ho: sílice; Tm: ZBLAN; Ho: ZBLAN; Yb, Ho: ZBLAN; Er, Yb, Tm: ZBLAN; Er, Tm: ZBLAN; Yb, Tm: ZBLAN; Tm, Ho: ZBLAN; Er, Yb, Ho: ZBLAN; Tm: fluoruro; Ho: fluoruro; Yb, Ho: fluoruro; Er, Yb, Tm: fluoruro; Er, Tm: fluoruro; Yb, Tm: fluoruro; Tm, Ho: fluoruro; Er, Yb, Ho: fluoruro; Tm: calcogenuro; Ho: calcogenuro; Nd: calcogenuro; Er: calcogenuro; Yb,

Ho: calcogenuro; Yb, Tm: calcogenuro; Tm, Ho: calcogenuro; o Yb, Ho: calcogenuro; Pr: calcogenuro; Dy: calcogenuro; Tb: calcogenuro y similares.

5 En una realización preferida, la fibra 13 óptica es una fibra de doble revestimiento. Se ha mostrado que las fibras de doble revestimiento producen unas potencias promedio altas y se conocen comúnmente en la técnica. En una realización alternativa, la fibra 13 óptica es una fibra de único revestimiento. En algunas realizaciones, pueden usarse combinaciones de fibras de único revestimiento y de doble revestimiento. Por ejemplo, puede bombearse el núcleo de una fibra de único revestimiento de Tm: sílice con láseres de fibra de Er: Yb: sílice (tales como láseres de fibra de Er: Yb: sílice de 1,57 μm).

10 El primer reflector 22 puede ser una red de Bragg de fibra (FBG) de doble revestimiento. Por ejemplo, puede usarse una FBG de rendimiento de longitud de onda de 2,1 micrómetros que tiene un 90–100% de reflectancia. El segundo reflector 24 es también una FBG de doble revestimiento o de único revestimiento de 2,1 micrómetros que tiene una reflectancia superior al 5%. En realizaciones preferidas, el segundo reflector 24 tiene una reflectancia de aproximadamente un 10–35%. En una realización, uno o ambos de los reflectores 22 y 24 primero y segundo son
15 FBG de doble revestimiento que se modulan por impulsos de frecuencia variable de tal manera que se permite una emisión de luz coherente aleatoria dentro de una banda espectral relativamente ancha. En una realización, la fibra 13 óptica tiene un diámetro de núcleo de aproximadamente 10 μm y un tamaño de revestimiento en un intervalo de 80–400 μm , y más preferentemente en un intervalo de 80–250 μm , y todavía más preferentemente en un intervalo de 100–150 μm . En una realización preferida, la fibra 13 óptica tiene un tamaño de revestimiento de aproximadamente 125 μm . Las características de cavidad en las realizaciones preferidas se enumeran en la tabla 1 a continuación:
20

Tabla 1

Fibra	Valor
Reflectancia de acoplador de salida	5–40%
Reflector alto	90–100%
Longitud (m)	0,5–8 m

25 En una realización preferida, la fuente 14 de energía es una fuente de diodo de bombeo acoplado por fibra de abertura de alto valor numérico (0,22–0,46) multimodo, que bombea al exterior luz de CW de 790 nm. Tales fuentes de diodo se conocen comúnmente en la técnica y pueden incluir, por ejemplo, los diodos de la Serie F2 de Coherent, Inc. (Santa Clara, CA, EE.UU.). En realizaciones alternativas, la fuente 14 de energía puede estar constituida por otros diodos de único emisor, conjuntos de diodos acoplados por fibra, disposiciones de diodos acoplados por fibras, diodos con acoplamiento de vacío a la fibra activa, y cualquier otra fuente adecuada. En algunas realizaciones, se usan múltiples fuente de energías.

30 El mecanismo 16 de acoplamiento es cualquier mecanismo adecuado para el acoplamiento de la fuente 14 de energía al láser de fibra. En una realización, el mecanismo 16 de acoplamiento es un acoplamiento directo, obtenido empalmado la fuente 14 de energía, por ejemplo un diodo láser, al láser de fibra. En otra realización, el mecanismo 16 de acoplamiento es un haz de fibras ahusadas (por ejemplo, de Sifam Fibre Optics, Reino Unido). En otras realizaciones más, el mecanismo 16 de acoplamiento puede incluir un conector, un acoplador de vacío, tecnología
35 de onda de GT (SPI Inc.), un prisma o una ranura en la fibra, o cualquier otro mecanismo adecuado. En algunas realizaciones, se usan múltiples mecanismos de acoplamiento.

Para producir una salida de longitud de onda alta, deben optimizarse diversos parámetros. Estos parámetros incluyen, por ejemplo, las concentraciones iónicas, las reflectividades especulares y la longitud de fibra. En algunas realizaciones, las concentraciones iónicas están en un intervalo de 300 partes por millón (ppm) – 35.000 ppm, y pueden estar en un intervalo de 8.000 ppm – 27.000 ppm y o pueden estar en un intervalo de 12.000 ppm – 22.000. La concentración de dopantes debería ser lo bastante alta para soportar la longitud de onda de la emisión de luz coherente en una longitud de fibra que puede invertirse mediante el bombeo. La cantidad efectiva de dopante es al menos más alta en un orden de magnitud que la cantidad efectiva de ión dopante en sistemas de láser de fibra disponibles comercialmente tales como, por ejemplo, la serie TLR (IPG Photonics, Oxford, MA, EE.UU.). Las
40 cantidades efectivas de ión dopante en tales sistemas pueden ser, por ejemplo, concentraciones de 200 ppm, que se ha mostrado que pueden entregar aproximadamente una absorción de 1 dB/m de luz de 1560 nm en el núcleo. Además, es importante aumentar la vida útil en la cavidad de un fotón. En ese sentido, la reflectancia especular de salida debería ser mayor que un 5%, y más preferentemente mayor que un 30%. El acoplador de salida se selecciona para lograr una emisión de luz coherente eficiente a la vez que se evita la realimentación a partir de
45 fuentes externas. La fibra puede estar configurada para absorber un 30–90% de la potencia de bombeo, con otros intervalos posibles incluyendo absorciones de un 40–90% y de un 60–90% de la potencia de bombeo. La longitud de fibra está configurada para ser más corta que la longitud de inversión para un funcionamiento de CW verdadero. En algunas realizaciones, la longitud de fibra varía de 0,5–12 m en longitud, o de 1–8 m en longitud y en algunas realizaciones de 2–5 m en longitud.

55 El rendimiento puede mejorarse adicionalmente si la energía de bombeo puede configurarse para enviarse de vuelta

a través de la fibra activa para un segundo paso. Se hace ahora referencia a la figura 19A, que es una ilustración esquemática de un láser 10' de fibra. El láser 10' de fibra incluye una cavidad 12 de láser', una fuente 14' de bombeo y un mecanismo 16' de acoplamiento tal como se muestra con respecto al láser 10 de fibra en la figura 1. No obstante, el láser 10' de fibra incluye además un reflector 50 de bombeo en un extremo que se encuentra opuesto a un extremo 19 de salida de la fibra. Además, en algunas realizaciones, la fuente 14' de bombeo se ubica en el extremo 19 de salida, de modo que la energía de bombeo puede reflejarse a través de la fibra 10' y enviarse a través de la fibra 10' por una segunda vez antes de salir en el extremo 19 de salida. El reflector 50 de bombeo puede ser, por ejemplo, un bucle especular, tal como el que se muestra en la figura 19.

Para un bucle especular tal como el mostrado en la figura 19, un combinador 17 de bombeo, que en este caso es un combinador multimodo de 2 a 1, se coloca a continuación de la FBG 22' reflectora alta de cavidad y se usa para conectar la fibra 10' en una forma a modo de bucle de vuelta a sí misma. Esto permite que la energía de bombeo se someta a un paso adicional en el sentido opuesto y salga a través de extremo 19 de salida. Para una retención de transmisión óptima en este sentido opuesto, el combinador 17 de bombeo es un acoplador lateral, tal como se describe en la patente de Los Estados Unidos N° 5.999.673 y en la publicación de solicitud de patente de Los Estados Unidos N° 2006/0133731 A1. Tales acopladores laterales incluyen una fibra de guiado de bombeo que tiene un revestimiento de fibra, un núcleo de fibra y una sección de unión, en la que la sección de unión tiene una sección de núcleo recta y una sección de núcleo ahusada, y una fibra de recepción que tiene un revestimiento interior al que la sección de unión está unida. En algunas realizaciones, el combinador 17 de bombeo y el mecanismo 16' de acoplamiento son ambos acopladores laterales. Se espera que la transmisión típica del bucle especular sea mayor que un 80% para el bombeo. En otras realizaciones, las fibras del acoplador no son de doble revestimiento ya que la señal de emisión de luz coherente, si aún existe alguna después de la FBG 22' de reflector alta, no necesita enviarse de vuelta al interior de la fibra. Puede usarse una fibra multimodo con las mismas dimensiones del primer revestimiento de la fibra de doble revestimiento.

La trayectoria del bombeo se muestra en la figura 19B, en la que la energía de bombeo se transmite a través de la fuente 14' de bombeo, que puede ser, por ejemplo, diodos de bombeo. La energía de bombeo pasa a través de la fibra 10' en el interior de y alrededor del reflector 50 de bombeo, y de vuelta a través de la fibra 10'. La trayectoria de la señal de láser se muestra en la figura 19C, en la que la señal de láser está contenida dentro de la cavidad 12 de láser', y se refleja por los reflectores 22' y 24'.

En una realización, se usa un láser de fibra Tm sílice disponible comercialmente. Se bombea con 10 W de luz de 790 nm. La longitud de onda de la emisión de luz coherente es de 2.097 nm, que es la longitud de onda natural de la emisión de luz coherente de Ho: YAG. Los parámetros se eligen tal como se describió anteriormente para producir un láser con al menos 1–2 W de potencia de salida.

Láser de fibra despolarizado para energía de pulso alto en la Banda IV

Para los fines de la presente solicitud, los siguientes términos se definen tal como sigue:

“Polarización” se define como el sentido del campo eléctrico dentro de un haz de luz.

La “luz polarizada” se define como luz en la que el estado de polarización cambia lo bastante lentamente como para medir el sentido de la onda de luz. El sentido no es necesariamente fijo en el tiempo.

La “luz despolarizada” se define como luz en la que el estado de polarización cambia tan rápido que se considera que tiene dos sentidos de polarización en todo momento.

Se hace ahora referencia a la figura 2, que es una ilustración de una configuración de un sistema 100 de láser de fibra que está diseñado para superar las limitaciones implicadas en la producción de un láser de fibra de alta energía en el intervalo de la banda IV. El sistema 100 incluye un oscilador 110 de láser despolarizado; al menos un amplificador 120, un polarizador 130, un primer dispositivo 140 de conversión de frecuencia y un segundo dispositivo 150 de conversión de frecuencia. El oscilador 110 de láser despolarizado puede ser un láser de fibra típico que está de forma natural significativamente despolarizado, una combinación de dos fuentes de láser polarizado, o un diodo láser que se ha despolarizado, de acuerdo con métodos que se describen más completamente a continuación en el presente documento. En un láser de fibra despolarizado de forma natural, el ancho de banda puede ser extremadamente estrecho y una modulación externa permite una generación de pulsos que es útil para la conversión de frecuencia. En un diodo láser que se ha despolarizado, existen opciones para cambiar la duración de pulso y la velocidad de repetición del sistema de láser. La salida del oscilador 110 despolarizado se amplifica por uno o más amplificadores 120 ópticos. Los amplificadores 120 ópticos pueden ser amplificadores múltiples, en los que cada uno de los amplificadores puede ser del mismo tipo o diferentes tipos de amplificadores. Se colima la salida despolarizada a partir del/de los amplificador(es) 120 óptico(s), y se envía a través del polarizador 130. En algunas realizaciones, el polarizador 130 es un polarizador de película delgada (por ejemplo, con número de catálogo 11B00HP.6 de Newport Corporation, Irvine, CA, EE.UU.). En otras realizaciones, el polarizador 130 es un cubo de polarización (por ejemplo, con número de catálogo 05BC15PH.9, Newport Corporation). Aproximadamente la mitad de la potencia aparecerá en cada estado de polarización: el estado P y el estado S. La luz polarizada de estado P se propaga luego a través del polarizador 130 al primer dispositivo 140 de conversión de frecuencia, mientras que la luz polarizada de estado S se propaga a través del polarizador 130 al segundo dispositivo 150 de conversión de frecuencia. Los dispositivos 140 y 150 de conversión de frecuencia primero y segundo son, por

ejemplo, un ZGP OPO que va a usarse con un láser de fibra de Tm: sílice, o un PPLN OPO que va a usarse con un láser de fibra de Yb: sílice, o cualquier otra configuración de fuente despolarizada de OPO adecuada. Algunos otros ejemplos incluyen OP–GaAS OPO o OPO/OPG, un PPMgO: LN OPO; y un OPG/OPA.

5 Las salidas de los OPO pueden recombinarse luego usando un polarizador para obtener una fuente colineal. En realizaciones alternativas pueden usarse otros dispositivos de conversión de frecuencia, tales como una configuración de OPG/OPA o cualquiera combinación. En consecuencia, se reducen los efectos térmicos y otros de alta potencia, permitiendo que se proporcione más energía de pulso a cada dispositivo de conversión de frecuencia. La configuración descrita en la presente memoria también permite una división estable de potencia entre los dispositivos 140 y 150 de conversión de frecuencia primero y segundo. La salida de los dos dispositivos de conversión de frecuencia puede opcionalmente recombinarse en el interior de un haz.

Existen diversas opciones para un oscilador despolarizado. Una opción es un diodo láser, ya que la duración de pulso, la velocidad de repetición, la potencia de pico, y la duración de pulso pueden seleccionarse fácilmente. No obstante, los diodos láser están generalmente polarizados, tal como establece la física del dispositivo. Ya que no se encuentra disponible comercialmente un oscilador de diodo láser despolarizado, el diodo debe despolarizarse.

15 La despolarización del láser se consigue tal como sigue:

Una fuente polarizada puede despolarizarse dividiendo la potencia por igual. Las dos mitades se recombinan luego como dos polarizaciones ortogonales después de experimentar un retardo relativo, $\Delta L = L_2 - L_1$, más largo que la longitud de coherencia, L_c de la fuente, es decir

$$\Delta L > L_c.$$

20 La longitud de coherencia se relaciona aproximadamente con la anchura espectral de banda de la fuente. La relación puede deducirse tal como sigue. El tiempo de coherencia, $\Delta\tau_c$, se relaciona con el anchura espectral, $\Delta\nu$, aproximadamente tal como sigue.

$$\Delta\tau_c \sim \frac{1}{\Delta\nu}$$

La distancia es igual a la velocidad multiplicada por el tiempo,

$$25 \quad L_c = c\Delta\tau_c$$

en la que c es la velocidad de la luz en el material. La anchura espectral puede medirse, por ejemplo, con un analizador de espectro óptico, en términos de la longitud de onda, $\Delta\lambda$, y convertirse luego a la frecuencia, $\Delta\nu$, usando la siguiente relación.

$$c = \nu\lambda \Rightarrow \Delta\nu = -\frac{c}{\lambda^2} \Delta\lambda$$

30 La anchura espectral puede convertirse luego a un tiempo de coherencia, y luego a la longitud de coherencia. Las tres ecuaciones anteriores pueden combinarse para dar

$$L_c = \frac{\lambda^2}{n\Delta\lambda}$$

Ec. 7

35 En este caso, el índice efectivo del modo de propagación en la fibra, n, se ha incluido para tener en cuenta la convención de que todas las longitudes de onda se miden en el vacío, pero la distancia se mide dentro de la fibra. La diferencia de trayectoria debe seleccionarse de modo que sea más larga que la longitud de coherencia de la fuente.

Se hace ahora referencia a la figura 3A, que es una ilustración esquemática de un despolarizador 200. El despolarizador 200 se construye a partir de dos divisores 210 de haz de polarización (PBS, *polarization beam splitter*). Un PBS se encuentra disponible, por ejemplo, de AFR, con número de catálogo PBS–06–P–N–B–1–Q. Cada PBS incluye una fibra 220 de no mantenimiento de polarización (PM, *polarization maintaining*) y dos fibras 230 de PM. En la realización mostrada y descrita en la presente memoria, la fibra 220 de no PM es una Flexcore 1060, y la fibra 230 de PM es una fibra Fujikura 980 Panda. Se empalman las fibras 230 de PM de ambos PBS 210, formando dos trayectorias: L1 y L2. La trayectoria L1 es lenta en relación con la trayectoria L2, ya que la luz polarizada a lo largo de la trayectoria L1 se encuentra a lo largo del eje 220 de fibra de no PM mientras que la luz

5 polarizada a lo largo de la trayectoria L2 es ortogonal al eje 220 de fibra de no PM. En una realización, la diferencia de longitud entre las dos trayectorias es de aproximadamente 15 cm. La pérdida de inserción para cada uno de los divisores para el despolarizador representado en la figura 3A es 0,67/0,80 dB y de 0,50/0,58 dB. La fibra 220 de no PM recibe señales a partir de un diodo 240 de señal. En una realización preferida, un controlador 250 de polarización se ubica entre el diodo 240 de señal y el despolarizador 200 para garantizar una división de potencia igual en el interior de ambos brazos. Un controlador de polarización se encuentra disponible, por ejemplo, de General Fotonics, CA, EE.UU. (número de catálogo PCD-M02).

10 Se hace ahora referencia a la figura 3B, que es una ilustración esquemática de un despolarizador 201. Un diodo 241 de señal acoplado a una fibra de mantenimiento de polarización se usa de tal modo que la luz se polariza a lo largo de una dirección conocida, normalmente el eje lento. Por este motivo, el controlador 250 de polarización puede eliminarse ya que puede usarse un divisor 50: 50 para obtener una división de igual potencia. El despolarizador 201 se construye a partir de un divisor 260 de mantenimiento de polarización (PM) 50: 50 y un divisor 210 de haz de polarización (PBS). Un divisor 260 de PM se encuentra disponible, por ejemplo, de Sifam, con número de catálogo FFP- 8K3264A10.

15 Otro opción para un oscilador despolarizado es un láser de fibra con un modulador externo. Se hace ahora referencia a la figura 4A, que es una ilustración esquemática de un oscilador 110' pulsado despolarizado. Un láser 315 de fibra fabricado con componentes de no mantenimiento de polarización generalmente está despolarizado. Si un cubo de polarización se ubica después de la fibra, hay normalmente una división de un 50%/50% + /- 10% en la potencia de salida entre los estados de polarización. Tal como se muestra en la figura 4A, un diodo 320 de bombeo bombea el láser 315 de fibra, que está hecho con componentes de no mantenimiento de polarización, a saber dos FBG 340 y una fibra 310 activa. Un modulador 330 externo colocado después del láser de fibra hace que el láser 315 de fibra obtenga pulsos y en consecuencia actúe como un oscilador 110' pulsado despolarizado para su uso en el sistema 100 de láser de fibra para producir un láser de fibra de alta energía en el intervalo de la Banda IV.

20 Se hace ahora referencia a la figura 4B, que es una ilustración esquemática de un oscilador 110'' despolarizado. Se proporcionan un primer láser 350 polarizado y un segundo láser 360 polarizado, no teniendo los láseres 350 y 360 polarizados primero y segundo coherencia temporal entre ellos. Los láseres 350 y 360 polarizados primero y segundo se combinan usando un cubo 370 de polarización, lo que da como resultado una fuente despolarizada.

25 Objetos y ventajas adicionales se harán evidentes para los expertos en la técnica después del examen de los siguientes ejemplos, que no pretenden tener un carácter limitante. Adicionalmente, cada una de los diversos aspectos y realizaciones de la presente invención tal como se reivindican en la sección de las reivindicaciones a continuación encuentra un apoyo experimental en los siguientes ejemplos.

Ejemplos

Se hace ahora referencia a los siguientes ejemplos, que junto con las descripciones anteriores, ilustran la invención de una forma no limitante.

35 EJEMPLO 1. Experimento: Salida de larga longitud de onda usando un láser de fibra de Tm: sílice

En los siguientes ejemplos, se usó una fibra de sílice de doble revestimiento dopada con Tm 20/200 con las especificaciones enumeradas en la tabla 2.

Tabla 2

fibra	valor
Tamaño del núcleo (µm)	20
NA del núcleo	0,11
Tamaño de revestimiento (µm)	200
NA del revestimiento	0,46
Conc. de dopante 1.026 átomos/m ³	0,5
Longitud de fibra	5
Forma del revestimiento	octógono

40 Los rendimientos de láser de una cavidad dada con las reflexiones superficiales especificadas se simularon a la señal y las longitudes de onda de bombeo específicas. La herramienta de simulación que se usó tiene la capacidad de predecir tanto la longitud de onda del láser como la curva de rendimiento, tanto para espejos espectralmente planos como para espejos de red de tipo *bulk* (BG, *bulk grating*).

Configuración I.

45 Se hace ahora referencia a la figura 5, que es una ilustración de una primera configuración de un láser de fibra que fue sometido a prueba. La fuente 14 de energía era una bomba de diodo que funcionaba a una longitud de onda de aproximadamente 790 nm. El mecanismo 16 de acoplamiento era un combinador de haz de vacío. Los reflectores 22

y 24 primero y segundo estaban adyacentes a unos espejos dicróicos planos, que tienen unas características tales como las enumeradas en la tabla 3.

Tabla 3

fibra	Parámetros
R1@2.000 nm	35%
R2@2.000 nm	80%
R2@800 nm	80%
Conc. de dopante 1.026 átomos/m ³	0,5

- 5 Espejos estaban adyacentes a extremos de fibra sin contacto físico de modo que la potencia de láser/ bombeo alto podría emitirse a través de ellos sin dañar la superficie.

Debido a que ningún recubrimiento en el combinador de haz de vacío se ajusta tanto a las longitudes de onda del bombeo como a las del láser, se usaron lentes con recubrimiento AR para la luz de bombeo.

- 10 Se midieron los resultados analizando la radiación de láser usando un potenciómetro 30, un fotodiodo 32 o un espectrómetro 34. El potenciómetro 30 era un potenciómetro Ophir (FL250A-SH-V1), el fotodiodo 32 era un detector de 800 MHz –PD–10,6 (Vilgo) – 2–12 um de fotoconductor rápido, y el espectrómetro 34 era un espectrómetro (BTC 500) de B&Wtek. La medición de espectro se llevó a cabo adicionalmente usando un monocromador CVI CM110, con un detector, un mecanismo de alineamiento, y un control informático por LabView integrados.

- 15 Configuración II.

- Se hace ahora referencia a la figura 6, que es una ilustración de una segunda configuración de un láser de fibra que fue sometido a prueba. La fuente 14 de energía era una bomba de diodo que funcionaba a longitudes de onda de 790 nm. El mecanismo 16 de acoplamiento era un combinador de haz de vacío. El primer reflector 22 era de tipo red de tipo *bulk*, que tiene unas características tales como las enumeradas en la tabla 4 (BG R) y el segundo reflector 24 era la escisión a cero grados de la fibra. La reflectancia para las BG enumeradas en la tabla incluye tanto la reflectancia de la red como el rendimiento de acoplamiento de la luz de vuelta al interior de la fibra. El láser mostrado en la figura 6, la red de tipo *bulk* se diseñó para reflejar selectivamente la luz a partir de 1.900–2.100 nm haciéndolo girar alrededor de su eje. Las redes de tipo *bulk* y los extremos 24 escindidos formaban el láser ajustable. Además, existía una cavidad secundaria indicada en la tabla 4 (R1 y R2) entre los dos extremos escindidos a cero grados de la fibra.

Tabla 4

fibra	Parámetros
R1@2.000 nm	5%
R2@2.000 nm	5%
BG R@2.000 nm	30%

- 30 Se midieron los resultados analizando la radiación de láser usando un potenciómetro 30, un fotodiodo 32 o un espectrómetro 34. El potenciómetro 30 era un potenciómetro Ophir (FL250A-SH-V1), el fotodiodo 32 era un detector de 800 MHz –PD–10,6 (Vilgo) – 2–12 um de fotoconductor rápido, y el espectrómetro 34 era un espectrómetro (BTC 500) de B&Wtek. La medición de espectro se llevó a cabo adicionalmente usando un monocromador CVI CM110, con un detector, un mecanismo de alineamiento, y un control informático por LabView integrados.

Configuración III.

- 35 Se hace ahora referencia a la figura 7, que es una ilustración de una tercera configuración de un láser de fibra que fue sometido a prueba. La fuente 14 de energía era una bomba de diodo que funcionaba a longitudes de onda de 790 nm. El mecanismo 16 de acoplamiento era un combinador de haz de vacío. Los primeros reflectores 22 eran de tipo red de tipo *bulk*, pero en este caso, el segundo reflector 24 era un espejo dieléctrico adyacente que tenía una alta reflectancia de aproximadamente un 30% tal como las enumeradas en la tabla 5. La diferencia entre esta configuración (Configuración III) y la configuración previa (Configuración II) es el acoplador de salida de un 30% en la cavidad de láser. La ecuación 6 predice que la emisión de luz coherente eficiente a unas longitudes de onda más largas debería ser posible aumentando las reflectividades especulares,

Tabla 5

fibra	Parámetros
R1@2.000 nm	35%
R2@2.000 nm	5%
BG R@2.000 nm	30%
atenuación de señal (dB/m)	0,1

5 Se midieron los resultados analizando la radiación de láser usando un potenciómetro 30, un fotodiodo 32 o un espectrómetro 34. El potenciómetro 30 era un potenciómetro Ophir (FL250A-SH-V1), el fotodiodo 32 era un detector de 800 MHz –PD–10,6 (Vilgo) – 2–12 μm de fotodiodo rápido, y el espectrómetro 34 era un espectrómetro (BTC 500) de B&Wtek. La medición de espectro se llevó a cabo adicionalmente usando un monocromador CVI CM110, con un detector, un mecanismo de alineamiento, y un control informático por LabView integrados.

Resultados:

Configuración I.

10 Se hace ahora referencia a la figura 8, que es una ilustración gráfica de una curva de rendimiento, que muestra el rendimiento de un láser de fibra de Tm: sílice tal como se describe con respecto a la Configuración I. Tal como se muestra en la figura 8, la pendiente del rendimiento era de aproximadamente un 60%, con un valor umbral de aproximadamente 3 W. El láser tenía una longitud de onda central de 1970 nm, tanto en los resultados simulados como en los reales.

15 Configuración II.

Se hace ahora referencia a la figura 9, que es una ilustración gráfica de longitudes de onda medidas y simuladas a diversas potencias, usando el láser de fibra de Tm: sílice descrito con respecto a la Configuración II. Tal como se muestra en la figura 9, las mayores potencias se obtuvieron para longitudes de onda de aproximadamente 1970 nm. La longitud de onda más larga posible de la emisión de luz coherente fue de 2.040 nm.

20 Configuración III.

Se hace ahora referencia a la figura 10, que es una ilustración gráfica de longitudes de onda medidas y simuladas a diversas potencias, usando el láser de fibra de Tm: sílice descrito con respecto a la Configuración III. Tal como se muestra en la figura 10, las longitudes de onda de emisión de luz coherente de hasta 2.150 nm se obtuvieron al bombarse con una potencia de bombeo de aproximadamente 12 W. Con una potencia más alta, una reflectancia de red más alta, y/o con una reflectancia de acoplador de salida más alta, la curva puede rebasar ese número. El rendimiento a 2.100 nm es la mitad del máximo.

Se hace ahora referencia a la figura 11, que es una ilustración de unas curvas de rendimiento para una emisión de luz coherente de alta longitud de onda. De acuerdo con los resultados mostrados en la figura 11, se puede esperar obtener 1 W de una radiación de láser de 2.095 nm y 250 mW a 2.140 nm, al bombarse con 12 W de 790 nm en esta configuración. Deberían poder obtenerse potencias más altas disminuyendo la pérdida de cavidad, a saber sustituyendo la red de tipo *bulk* con una FBG.

Se hace ahora referencia a la figura 12, que es una ilustración de una potencia de salida medida y simulada a unas potencias de emisión diferentes para una salida de longitud de onda de 2.100 nm. Tal como se muestra en la figura 12, el rendimiento del mecanismo de acoplamiento de vuelta de red de tipo *bulk* descrito en la Configuración III es de aproximadamente un 30%.

Se hace ahora referencia a la figura 13, que es una ilustración de estabilidad de láser mientras se hace funcionar con una potencia de bombeo alta. Se mostró que el funcionamiento del láser de fibra de la configuración III era un modo de CW, sin ninguna fluctuación significativa.

40 Los resultados descritos en la presente memoria fueron destacables en que no se ha mostrado otro láser de fibra de Tm: sílice de doble revestimiento que produzca un funcionamiento de una longitud de onda tan larga. Los resultados indican que la salida es tal como se desea. Es decir, los parámetros definidos en la presente memoria dan como resultado una oscilación de onda continua que tiene longitudes de onda largas con un rendimiento relativamente alto (10–20%).

45 Se describe la aplicación de los resultados para el diseño de un láser de fibra eficiente. El diseño de tipo *bulk* del láser presentado anteriormente limita su aplicabilidad como láser de fibra para muchas aplicaciones. Las limitaciones incluyen la necesidad de inyectar una luz de bombeo a través de un combinador de tipo *bulk* y la necesidad de acoplar la luz láser reflejada en el interior del núcleo de la fibra con otro combinador de tipo *bulk*, reduciendo ambos significativamente el rendimiento y la estabilidad globales del láser de fibra.

En ese sentido, debería usarse una red de Bragg de fibra de doble revestimiento (FBG), tal como se ha descrito anteriormente. Se determinó que una nueva fibra de Tm: sílice con las siguientes características era una buena fibra 13 óptica para su uso en la presente invención:

Tabla 6

fibra	parámetros
Tamaño del núcleo (µm)	11,5
NA del núcleo	0,13
Tamaño de revestimiento (µm)	125
NA del revestimiento	0,49
Conc. de dopante 1.026 Átomos/m	0,9
Longitud de fibra	3-5
Forma del revestimiento	octógono

5

EJEMPLO 2. Ejemplo de Diseño: Influencia de los parámetros sobre la longitud de onda de la emisión de luz coherente y sobre el rendimiento

Como ejemplo de parámetros de selección, se seleccionó una fibra de 10/125 Tm. La longitud de onda de la emisión de luz coherente se fijó a 2.095 nm, que es similar a la de un Ho: YAG. Se sometieron a prueba diversas concentraciones dopantes diferentes. Para cada concentración de dopantes, se varió la longitud de fibra y la reflectancia del acoplador de salida. A continuación se enumeran los parámetros y valores en la tabla 7.

10

Tabla 7

Parámetro	Unidad	Valor
N (concentración de Tm)	Átomos/m ³	variable
Diámetro de núcleo	µm	10
Diámetro de revestimiento	µm	125
Absorción de revestimiento de bombeo	dB/m	variable
Pérdida de núcleo de señal	dB/m	0,22
L (longitud de fibra)	m	variable
R1 (reflectancia)	%	variable
R2 (reflectancia)	%	80
Potencia de bombeo	W	32
Lado de bombeo		R1

Las restricciones son tal como sigue:

15

- 1) La longitud de fibra máxima es de un 80-90% de absorción de bombeo para invertir completamente los medios activos para garantizar una verdadera emisión de luz coherente de CW.
- 2) La reflectancia del espejo y la longitud pueden seleccionarse luego para un funcionamiento eficiente para una concentración de dopantes dada.

20

Se hace ahora referencia a las figuras 14A-14D, que son ilustraciones gráficas que muestran rendimientos de láser (en porcentaje) a 2.095 nm para cuatro concentraciones diferentes en función de la longitud de fibra y de la reflectancia especular. Las combinaciones de parámetros usadas se representan a continuación en la tabla 8.

Tabla 8

concentración de Tm			Absorción de revestimiento de 790 nm (dB/m)	longitud de abs. (m) de 80%	longitud de abs. (m) de 90%
Átomos/m ³	ppm	% en peso			
1 e25	1313	0,15	0,23	30,6	43,7
1,5 e25	1926	0,22	0,36	21	30
2 e25	2626	0,44	0,46	15	22
3,5 e25	4466	0,51	0,78	7	10

25

En este ejemplo, puede verse que si las FBG se colocan para seleccionar 2.095 nm, no se obtendrá en absoluto un láser para N=1,0 e25 átomos/m³, tal como se muestra en la figura 14A. Esto puede conducir a la conclusión equivocada de que Tm puede no soportar 2.095 nm. La conclusión correcta es que el láser en esta configuración no puede emitir luz coherente a esta longitud de onda. Para N=1,5 e25, 1,0 e25 átomos/m³, tal como se muestra en la figura 14B, sólo se obtendrá un láser para reflectividades de salida mayores que un 8%, pero los rendimientos serán

muy bajos ya que se absorbe menos de un 50% de la potencia de bombeo. A medida que se aumenta la concentración de dopantes a 2×10^{25} átomos/m³, tal como se muestra en la figura 14C, el rendimiento también se aumenta. El rendimiento de conversión óptimo se produce para una fibra larga de 8 m con acoplador de salida de un 20% con sólo el 57% del bombeo absorbido. En este ejemplo, el mayor rendimiento se produce para $N = 3,5 \times 10^{25}$ átomos/m³, tal como se muestra en la figura 14D. Una fibra de 6 m absorbe el 66% del bombeo. Incluso así, el láser tiene un rendimiento global de un 22%, o 32 W de potencia de bombeo lo que produce una potencia de 7 W de 2.095 nm.

Estos resultados muestran que la posibilidad de que la fibra emita luz coherente a una longitud de onda dada depende de la concentración de dopantes, la longitud de fibra, y las reflectividades especulares. Se desea la fibra más corta posible para limitar la pérdida del láser puesto que la fibra absorbe la señal pero se requiere una fibra larga para tener una buena absorción de bombeo. La fibra más larga está limitada por la regla de inversión del 80–90% para un funcionamiento de CW.

Otro ejemplo se muestra para una fibra de Tm sílice comercialmente disponible. El láser se bombea con 10 W de luz de 790 nm. La longitud de onda de la emisión de luz coherente se elige como 2.097 nm, que es la longitud de onda natural de la emisión de luz coherente de Ho:YAG. En la práctica, los parámetros de diseño de fibra (la concentración de dopantes, el diámetro de núcleo, el diámetro de revestimiento) se determinan por el fabricante. Las combinaciones de parámetros usadas se representan a continuación en la tabla 9.

Tabla 9

Parámetro	Unidad	Valor
N (concentración de Tm)	Átomos/m ³	9×10^{25}
Diámetro de núcleo	Mm	10
Diámetro de revestimiento	Mm	125
Pérdida de núcleo de señal	dB/m	0,22
L (longitud de fibra)	m	variable
R1 (reflectancia)	%	variable
R2 (reflectancia)	%	80
Potencia de bombeo	W	32
Lado de bombeo		R1

Se hace ahora referencia a la figura 15, que es una ilustración gráfica que muestra potencias de láser de una fibra con los parámetros mostrados en la tabla 9. El rendimiento puede aumentarse elevando el acoplador especular de reflector alto (R2) a >99%. Incluso con esta configuración con un acoplador de salida de un 8% y una fibra de 2,25 m, el rendimiento global es >20% con un 65% de absorción de bombeo. A partir de 32 W de potencia de bombeo a 790 nm, se obtiene una potencia de señal de 7 W de 2.095 nm.

EJEMPLO 3. Despolarización de diodo láser

Se usó un diodo láser de señal estabilizado externamente (Lumics LU1064M150–1001002, S/N 51440). Para obtener un espectro estrecho en funcionamiento pulsado, la FBG se movió de 1,8 m a partir del diodo a aproximadamente 60 cm a partir del diodo. Además, se colocó un controlador de polarización entre la FBG y el diodo para garantizar que la realimentación a partir de la FBG estaba alineada con la polarización del diodo. Todas las mediciones de CW se realizaron a una intensidad de bombeo de 300 mA. Todas las mediciones de pulsos se realizaron con pulsos de 100 ns, 100 kHz, y una intensidad de pico de 1,2 A (ILX LDP– 3840).

El diodo se evaluó en funcionamiento pulsado y de CW, con y sin el despolarizador. Se registraron las trazas y los espectros temporales.

La despolarización se efectuó usando una configuración de despolarizador tal como se describió anteriormente con referencia a la figura 3. Se usó un controlador de polarización en el experimento. Un analizador de polarización se usó para medir la pureza del estado de polarización. Se hace ahora referencia a la figura 16, que es una ilustración esquemática de un analizador de polarización. La pureza del estado de polarización se midió controlando pasando la luz de fuente a través de dos placas de ondas de $\lambda/4$, una placa de ondas de $\lambda/2$, y un cubo de polarización (Newport 10FC16PB.7). Un detector detectó la cantidad de polarización en tanto en modo de CW como de funcionamiento pulsado.

Resultados:

La longitud de coherencia dentro de la fibra usando la anchura total a media altura (FWHM, *full width at half maximum*) menos la resolución de la OSA ($0,12 \text{ nm} - 0,6 \text{ nm} = 0,06 \text{ nm}$) que a partir de Tabla 6 se determina como de 1,3 cm usando la ecuación 7. Esto es aproximadamente 40 m de fibra de Fujikura Panda 980, con una longitud de resonancia de 3,3 mm. Ya que 40 m de esta fibra no son suficientes para cifrar completamente la polarización, la longitud debería ser mucho mayor haciendo poco práctico un despolarizador de tipo Lyot convencional ya que la

longitud de fibra necesita ser de cientos de metros.

La polarización se alineó monitorizando la potencia transmitida a través del polarizador con un potenciómetro para alineamiento basto. El alineamiento fino se realizó usando un fotodiodo y girando las placas de ondas. El controlador se ajustó de tal modo que no se apreció cambio alguno en la forma de los pulsos. Tanto en funcionamiento pulsado como de CW, se determinó que más de un 98% de la potencia que dejaba el cubo de polarización estaba linealmente polarizada.

Se hace ahora referencia a las figuras 17A y 17B, que son ilustraciones gráficas de trazas y espectros temporales, respectivamente, del diodo láser antes y después de la despolarización. La traza temporal con el despolarizador es basta, tal como se esperaba.

La estabilidad temporal se comprobó también usando un osciloscopio analógico. Se vieron muchos pulsos de forma simultánea. No se apreciaron grandes variaciones de pulso a pulso.

En consecuencia, se determinó que un despolarizador tal como el de la presente invención puede despolarizar de forma efectiva un diodo que funciona en modo de pulsos. El despolarizador es un dispositivo pasivo, y no altera el espectro o la anchura de los pulsos del pulso óptica. Aunque se observaron pequeñas fluctuaciones en la traza de pulso despolarizada, estas fluctuaciones no fueron significativas. La diferencia en la longitud de trayectoria entre las dos ramas en el despolarizador debe ser mucho mayor que la longitud de coherencia para la despolarización efectiva.

Ejemplo 4: Resultados de laboratorio de potencia de banda IV

Un láser de fibra para producir longitudes de onda en la Banda IV fue sometido a prueba en el laboratorio. Se hace ahora referencia a la figura 18, que es una ilustración gráfica de resultados de laboratorio para un láser de fibra despolarizado. La potencia de bombeo se muestra en el eje X, y la potencia de la Banda IV se representa en el eje Y. Los resultados muestran que, por ejemplo, un bombeo de 10 W pudo producir una potencia de la banda IV de 700 mW con un rendimiento de un 70%. Esto indica la factibilidad del uso de un láser despolarizado tal como se describió anteriormente con el fin de producir longitud de onda de Banda IV.

Aislante de fibra de alta potencia

Diversos componentes usados en láseres de fibra son esencialmente componentes ópticos de tipo *bulk*, tales como aislantes, ciertos filtros, y moduladores de alta potencia. Para acoplar la luz en el interior de estos componentes, primero debe eliminarse de la fibra, pasarse a través del elemento como un haz de luz colimada, y luego insertarse de vuelta al interior de la fibra. Las soluciones para el acoplamiento de luz a estos elementos de tipo *bulk* están disponibles comúnmente para una potencia óptica de 300 mW. Ciertos componentes especialmente diseñados pueden manejar hasta 10 Vatios. Por encima de esa cantidad, y específicamente para alta potencia (del orden de 50 Vatios), hay un serio riesgo de combustión asociado con el intento de acoplar la luz a través de la lente de enfoque y en el interior de la segunda fibra. La parte de la luz que no consigue introducirse y propagarse en el interior del núcleo de la fibra debe absorberse en algún otro lugar, lo que conduce a un calentamiento y da como resultado la combustión del conector o un calentamiento no admisible del elemento. El calentamiento puede especialmente ser un problema ya que el alineamiento mecánico puede perderse, lo que conduce a un fallo catastrófico, o el elemento puede perder el rendimiento deseado debido a los cambios de temperatura.

Se hace ahora referencia a la figura 20, que es una ilustración esquemática de un sistema 100 para volver a hacer converger una luz de alta potencia en el interior de una segunda fibra. El sistema 100 incluye una primera fibra 102 que tiene un orificio 104 de entrada de la primera fibra, un orificio 106 de salida de la primera fibra, y una tapa 107 de extremo de la primera fibra ubicada en el orificio 106 de salida de la primera fibra. Una primera lente 118 se coloca inmediatamente por fuera de la tapa 107 de extremo de la primera fibra, y está configurada para colimar la luz que sale del orificio 106 de salida de la primera fibra. El sistema 100 incluye además una segunda fibra 108 que tiene un orificio 110 de entrada de la segunda fibra, un orificio 112 de salida de la segunda fibra y una tapa 113 de extremo de la segunda fibra adyacente al orificio 110 de entrada de la segunda fibra. Una lente 120 de enfoque se coloca inmediatamente por fuera de la tapa 113 de extremo de la segunda fibra, y está configurada para hacer converger la luz en el interior del núcleo de la segunda fibra 108. La segunda fibra 108 es una fibra de doble revestimiento, que tiene un revestimiento 122 interior y un revestimiento 124 exterior, e incluye además un supresor 114 de modos ubicado entre el orificio 110 de entrada de la segunda fibra y el orificio 112 de salida de la segunda fibra. El doble revestimiento permite a la luz que no se ha emitido al interior del núcleo de la segunda fibra 108 propagarse a través del revestimiento 124 exterior y eliminarse posteriormente por el supresor 114 de modos antes de la salida de la luz convergente a través del orificio 112 de salida de la segunda fibra. El sistema 100 puede incluir un componente 116 óptico de tipo *bulk* ubicado entre el orificio de salida de la primera fibra 104 y el orificio 110 de entrada de la segunda fibra, y más específicamente, ubicado entre la lente 118 de colimación y la lente 120 de enfoque. El componente 116 óptico de tipo *bulk* puede ser, por ejemplo, un aislante, un modulador (tal como un modulador electroóptico o un modulador acústico-óptico), o cualquier otro componente óptico de tipo *bulk*, incluyendo la ausencia de un componente.

En algunas realizaciones, el revestimiento 124 exterior de la segunda fibra 108 es un revestimiento rígido, que

5 permitiría que la segunda fibra 108 se mantuviera en su lugar dentro de un conector. Un ejemplo de un revestimiento rígido es, por ejemplo, un vidrio de bajo índice óptico. Si el primer revestimiento de esta fibra se hace a partir de sílice fundido puro, luego el segundo revestimiento rígido puede estar compuesto de sílice dopado con fluorina. Tales fibras de doble y triple revestimiento existen actualmente en el mercado. Pueden usarse fibras de triple
10 revestimiento en las que el primer revestimiento es un vidrio rígido y el segundo revestimiento es un polímero. El polímero puede retirarse de modo que esencialmente queda una fibra de doble revestimiento de vidrio. Los expertos en la técnica apreciarán que los términos doble revestimiento y triple revestimiento hacen referencia a un revestimiento que se mantendrá de manera rígida y está hecho a partir de un material rígido. En consecuencia, otra realización es el uso de fibras de cuádruple revestimiento con un revestimiento más interior de vidrio. En algunas realizaciones, la tapa 113 de extremo está compuesta de una fibra multimodo que tiene el mismo revestimiento que el revestimiento 124 exterior.

15 Normalmente, la abertura numérica (NA, *numerical aperture*) de los núcleos de las fibras se encuentra de 0,06 a 0,15. Cuando se hace converger la luz de vuelta al interior de la fibra debería tener una NA similar. Por lo tanto, el uso de una fibra de sílice fluorada convencional con una NA de 0,22 debería ser suficiente para capturar toda la luz que no alcance el núcleo.

En otra realización, las fibras 102 y 108 primera y segunda son fibras de doble revestimiento. De este modo, un supresor de modos puede también colocarse en la fibra de entrada para limitar y eliminar cualquier luz de propagación regresiva que no se elimine o absorba en cualquier otro lugar.

20 Se hace ahora referencia a la figura 21, que es una ilustración esquemática de la segunda fibra 108, de acuerdo con realizaciones de la presente invención. En la realización representada en la figura 21, la segunda fibra 108 se empalma, lo que da como resultado una parte 130 proximal y una parte 132 distal. El revestimiento 124 exterior difiere en cada una de las partes 130 y 132 proximal y distal. En una realización, el revestimiento 124 exterior de la parte 130 proximal se compone por vidrio, para proporcionar rigidez tal como se describió anteriormente, mientras que el revestimiento 124 exterior de la parte 132 distal se compone de un material polimérico. Esta configuración
25 permite que se retire una parte del revestimiento 124 exterior (en una zona del supresor 114 de modos), permitiendo en consecuencia la eliminación de la luz por el supresor 114 de modos. La parte 130 proximal y la parte 132 distal se unen en una zona 134 de conexión, en la que se aplica un recubrimiento de polímero al revestimiento 124 exterior. En algunas realizaciones, el recubrimiento de polímero de la zona 134 de conexión es un polímero igual al usado para el revestimiento 124 exterior de la parte 132 distal.

30 Otro fuente de calor no deseado potencial es la retrorreflexión a partir de la superficie de contacto aire-fibra. Esto debería ser de aproximadamente un 5% si no se usa un recubrimiento antirreflexión (AR) para fibras de sílice. Normalmente, el conector se ubica en ángulo para evitar la retrorreflexión en el interior del núcleo, pero si no se usa el supresor 114 de modos esta luz o bien debe absorberse en el interior del revestimiento o bien se filtrará al exterior de la fibra. Como ejemplo, si se desea un aislante de 50 W, entonces se perderán 2,5 W en la superficie de contacto
35 aire-fibra de cada conector. Con un recubrimiento AR de $R < 0,5\%$, la cantidad se reducirá a 250 mW.

A pesar de que la invención se ha descrito junto con realizaciones específicas de la misma, es obvio que muchas alternativas, modificaciones y variaciones serán evidentes para los expertos en la técnica. En consecuencia, ésta tiene como finalidad abarcar todas las alternativas, modificaciones y variaciones entren dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas. Además, no deberá interpretarse la mención o identificación de cualquier referencia en esta solicitud como una admisión de que tal referencia se encuentra disponible como técnica anterior de la presente
40 invención.

REIVINDICACIONES

1. Un láser para producir longitudes de onda en la banda IV de infrarrojo, que comprende:

un oscilador (110) de láser despolarizado para producir luz despolarizada en un primer estado ortogonal y en un segundo estado ortogonal;

5 al menos un amplificador (120) de fibra para amplificar dicha luz despolarizada;

un polarizador (130) para separar dicha luz despolarizada amplificada en un primer estado ortogonal y en un segundo estado ortogonal;

un primer dispositivo (140) de conversión de frecuencia para convertir dicha luz despolarizada amplificada en dicho primer estado ortogonal en una longitud de onda en la banda IV; y

10 un segundo dispositivo (150) de conversión de frecuencia para convertir dicha luz despolarizada amplificada en dicho segundo estado ortogonal en una longitud de onda en la banda IV, en el que

dicho oscilador (110) de láser despolarizado es un diodo láser, despolarizándose la luz de salida de dicho diodo láser por un despolarizador (200), **caracterizado porque** dicho despolarizador (200) comprende:

15 un primer divisor (210) de haz de polarización que tiene una fibra (220) de entrada y dos fibras (230) de salida; y

un segundo divisor (210) de haz de polarización que tiene dos fibras (230) de entrada y una fibra (220) de salida, en el que

20 dichas dos fibras de entrada de dicho segundo divisor (210) de haz de polarización se empalman con dichas dos fibras de salida de dicho primer divisor (210) de haz de polarización formando una primera trayectoria y una segunda trayectoria, siendo una diferencia de longitudes entre dichas trayectorias primera y segunda mayor que una longitud de coherencia de dicho diodo láser.

2. El láser según la reivindicación 1, en el que dicho primer divisor (210) de haz de polarización es un divisor que mantiene una polarización de 50/50.

25 3. El láser según la reivindicación 1, en el que dicho al menos un amplificador (120) incluye amplificadores (120) múltiples.

4. El láser según la reivindicación 1, en el que dichos primer y segundo dispositivos (140; 150) de conversión de frecuencia se seleccionan del grupo que consiste en: un ZGP OPO; OP-GaAS OPO; un OP-GaAS OPO/OPG; un PPLN OPO; un PPMgOILN OPO; y un OPG/OPA.

30 5. El láser según la reivindicación 1, en el que dicho al menos un amplificador (120) se selecciona del grupo que consiste en: Yb: sílice; Ho: sílice; Yb, Ho: sílice; Yb, Tm: sílice; Tm, Ho: sílice; Yb, Ho: sílice, Tm: ZBLAN; Yb: ZBLAN; Ho: ZBLAN; Er: ZBLAN; Yb, Ho: ZBLAN; Yb, Tm: ZBLAN; Tm, Ho: ZBLAN; Yb, Ho: ZBLAN, Tm: fluoruro; Yb: fluoruro; Ho: fluoruro; Nd: fluoruro; Er: fluoruro; Yb, Ho: fluoruro; Yb, Tm: fluoruro; Tm, Ho: fluoruro; Yb, Ho: fluoruro, Tm: calcogenuro; Yb: calcogenuro; Ho: calcogenuro; Nd: calcogenuro; Er: calcogenuro; Yb, Ho: calcogenuro; Yb, Tm: calcogenuro; Tm, Ho: calcogenuro; Pr: calcogenuro; Dy: calcogenuro; Tb: calcogenuro; e Yb, Ho: calcogenuro.

35

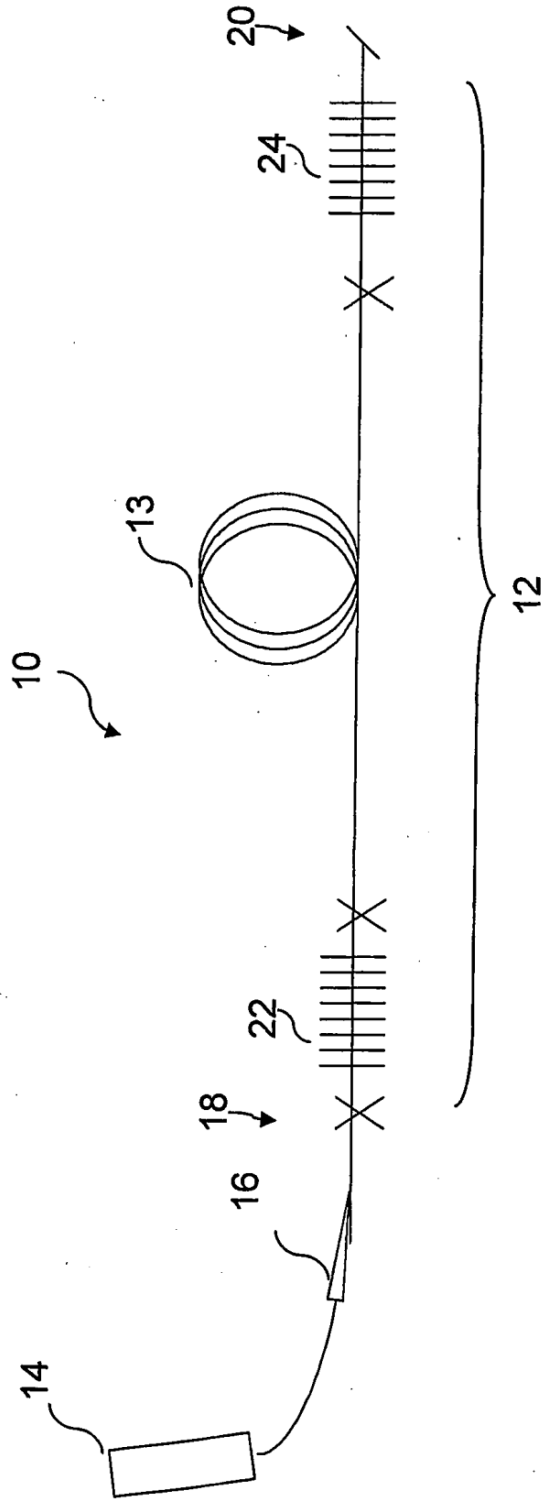


FIG. 1

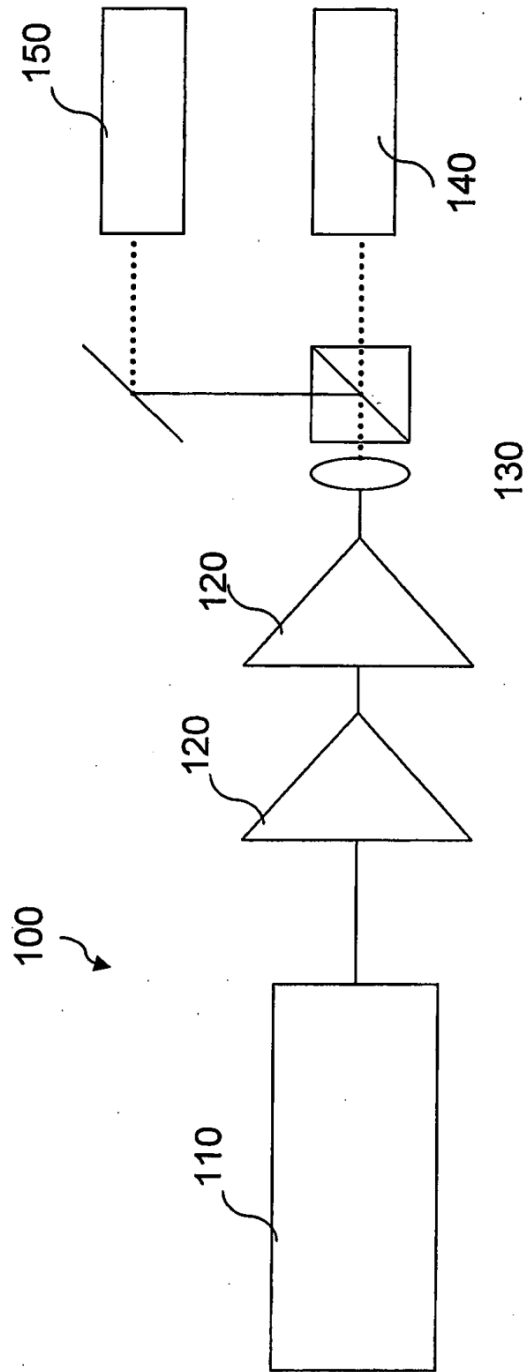


FIG. 2

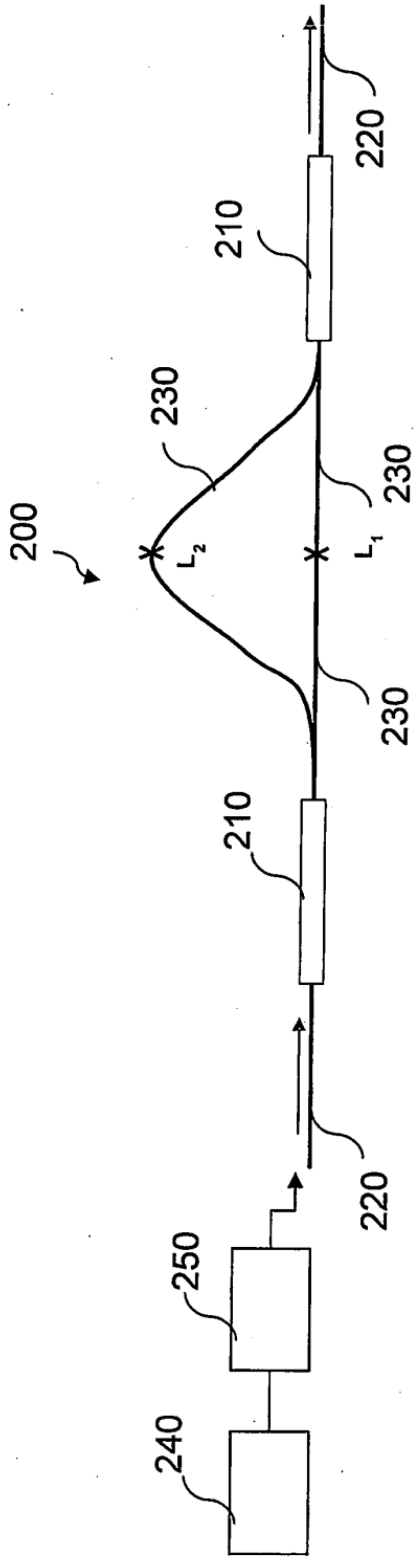


FIG. 3A

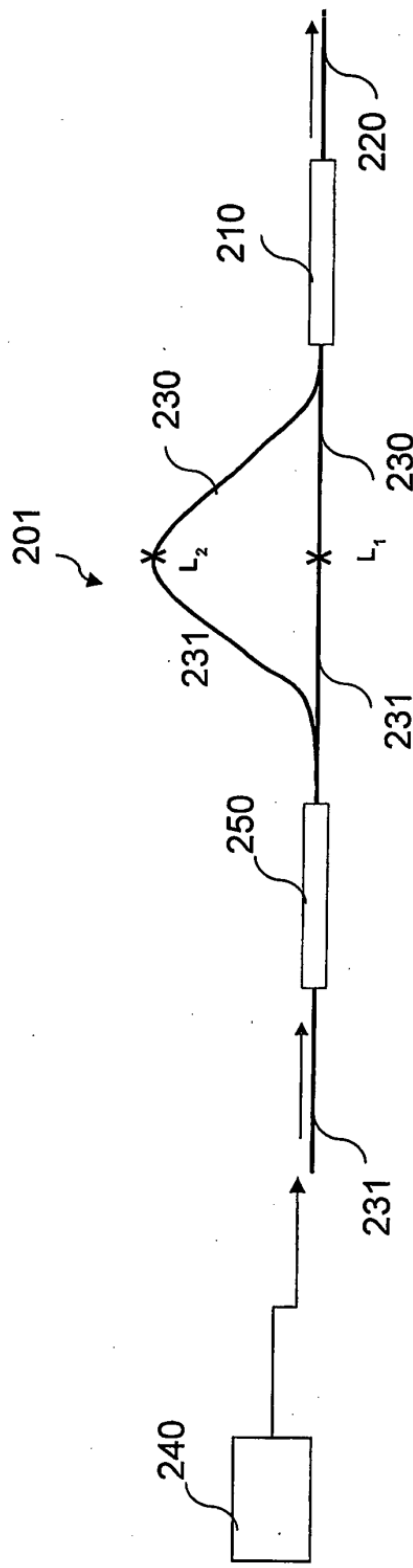


FIG. 3B

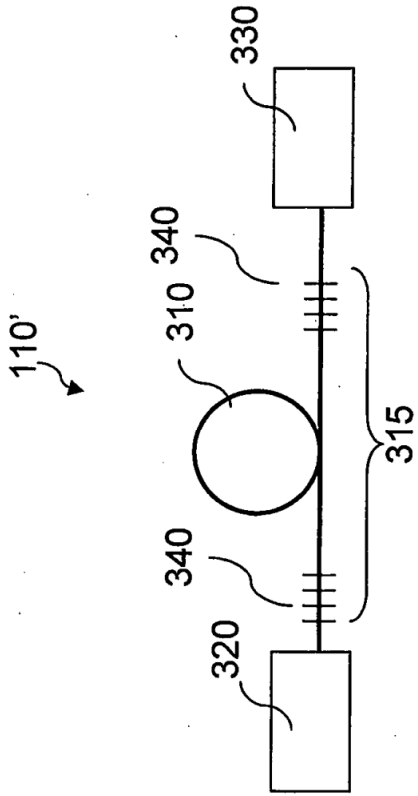


FIG. 4A

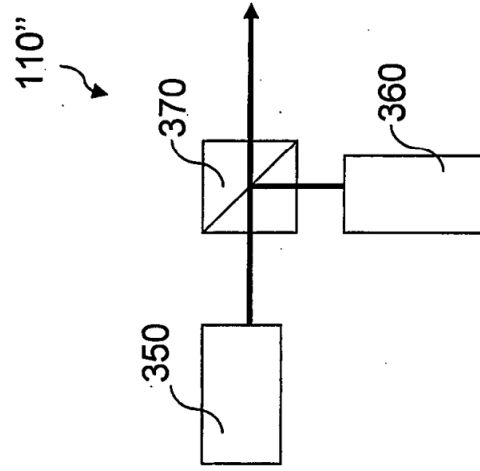


FIG. 4B

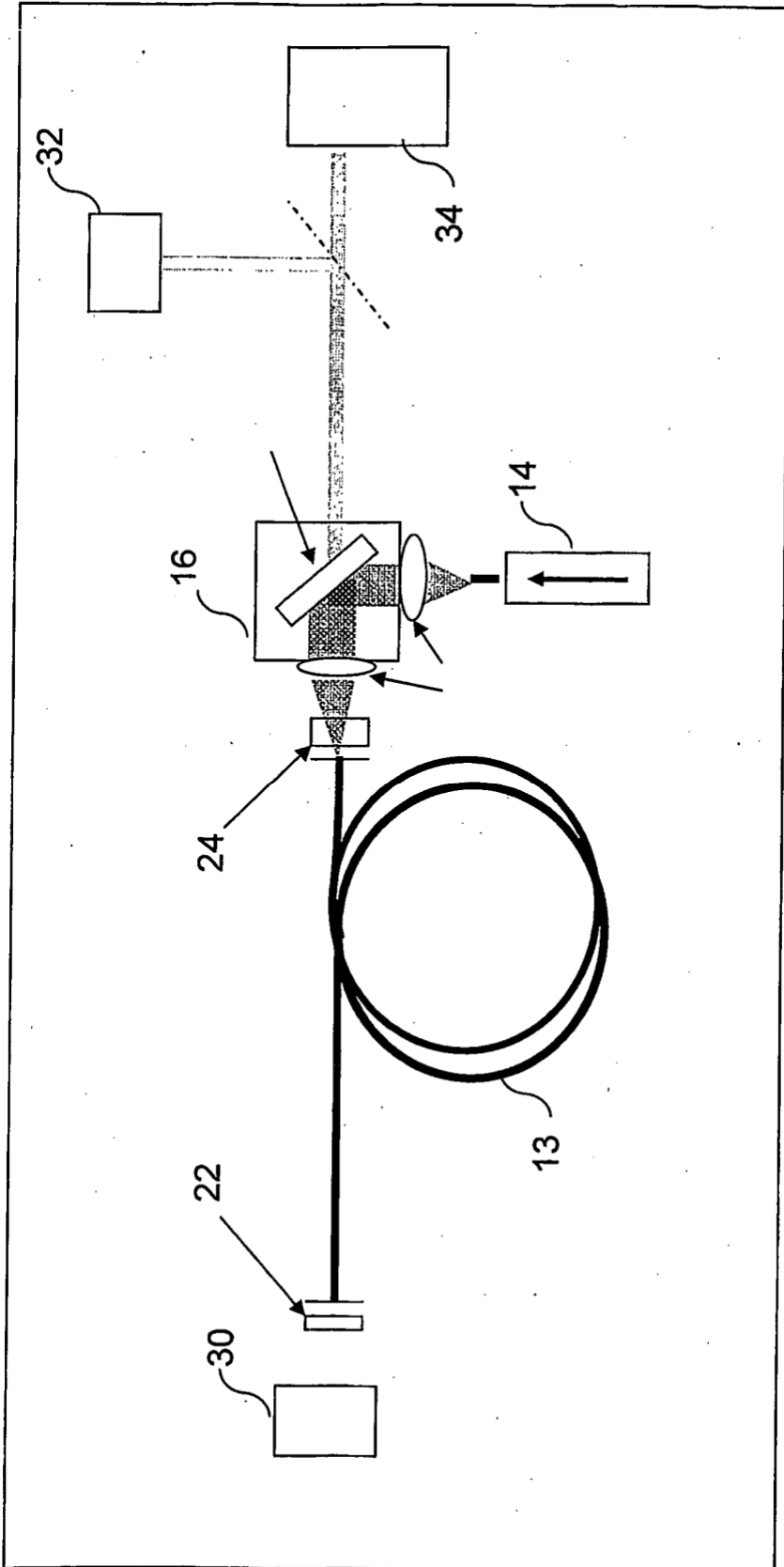


FIG. 5

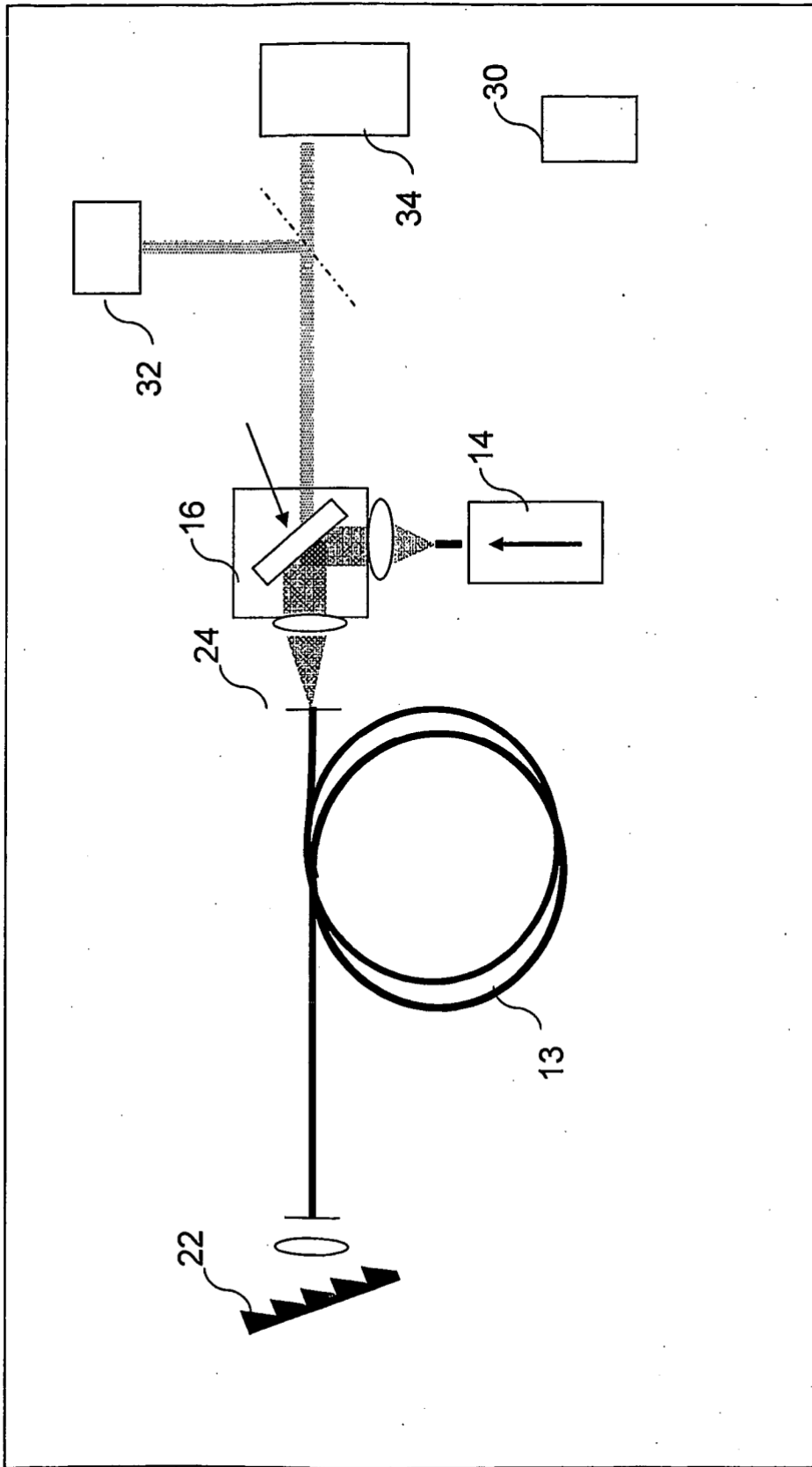


FIG. 6

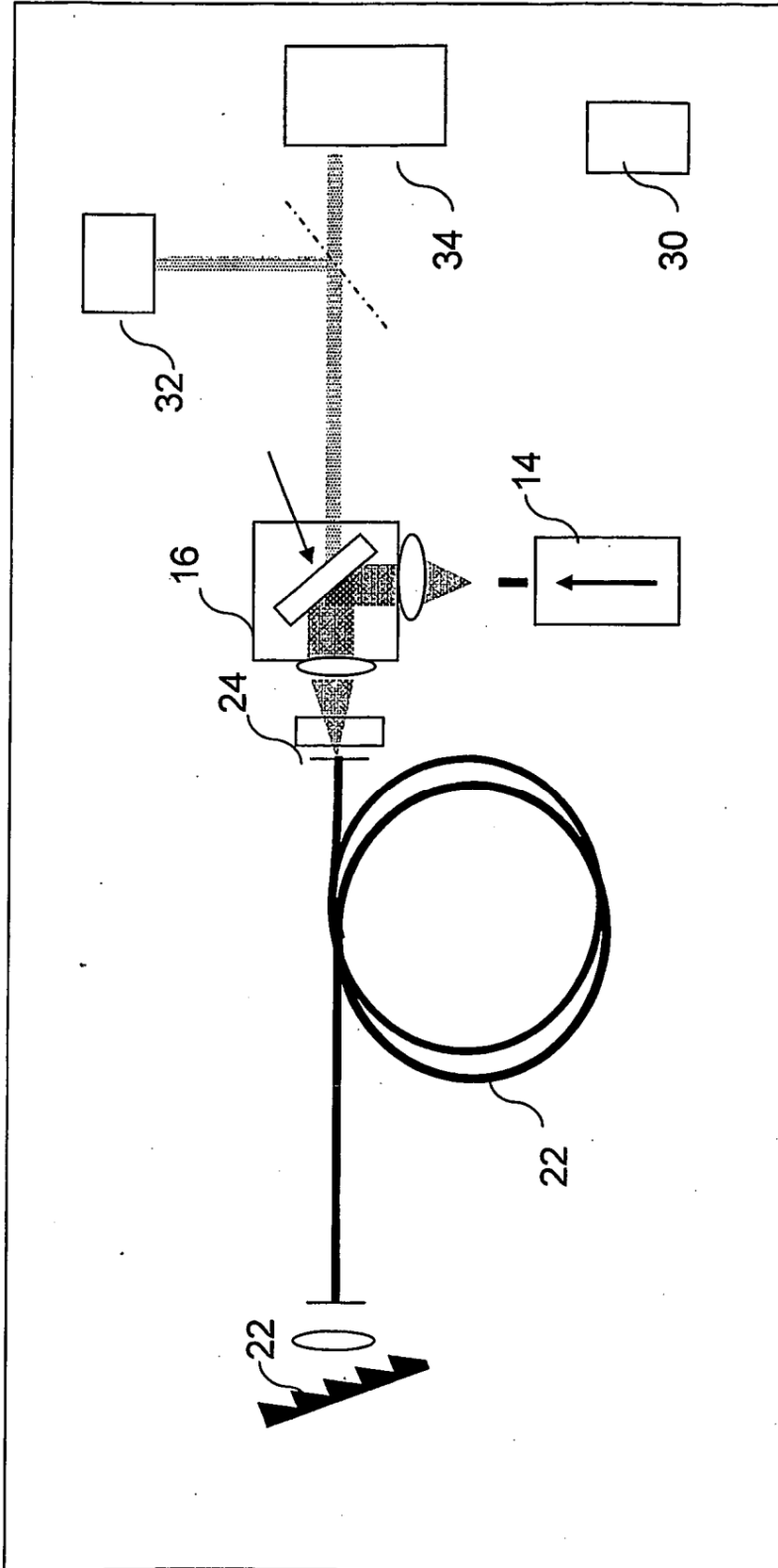


FIG. 7

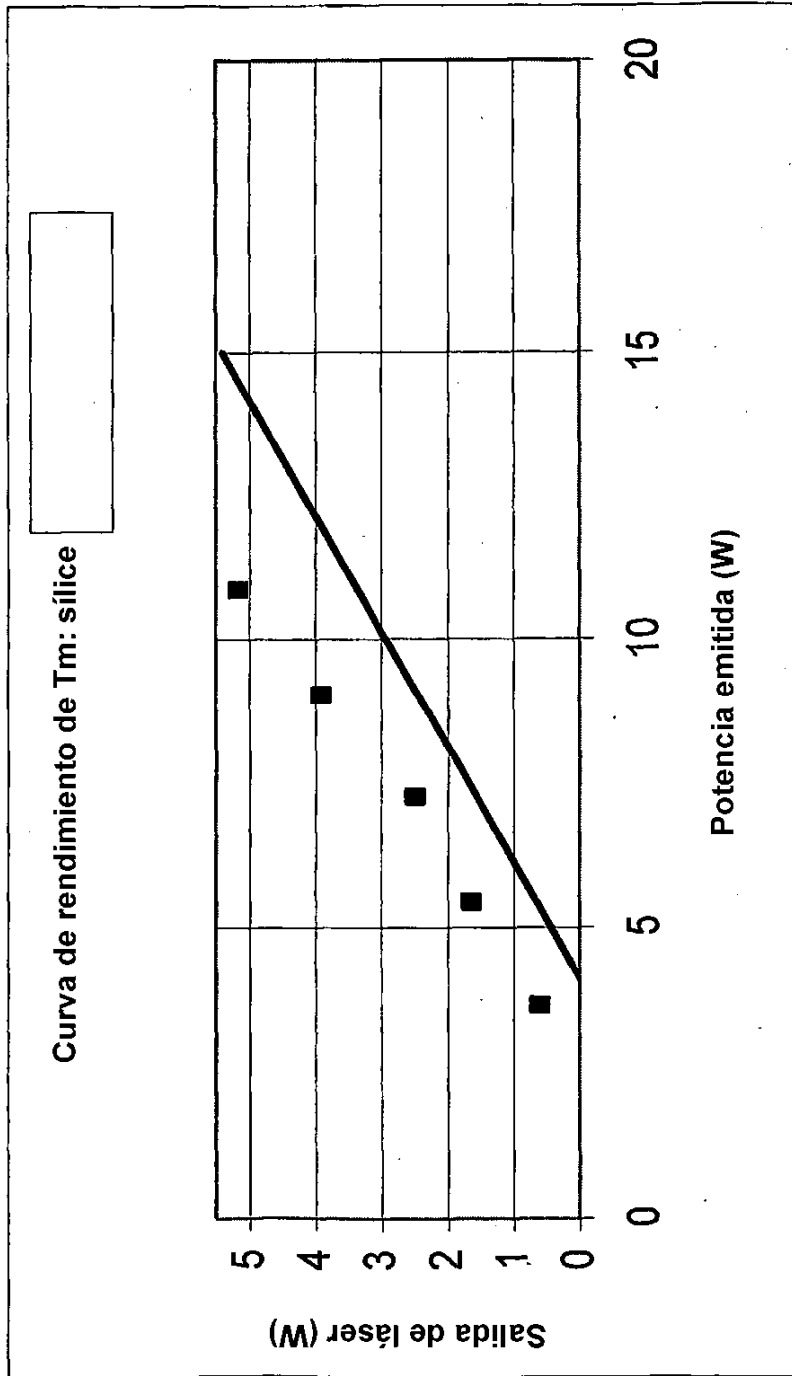


FIG. 8

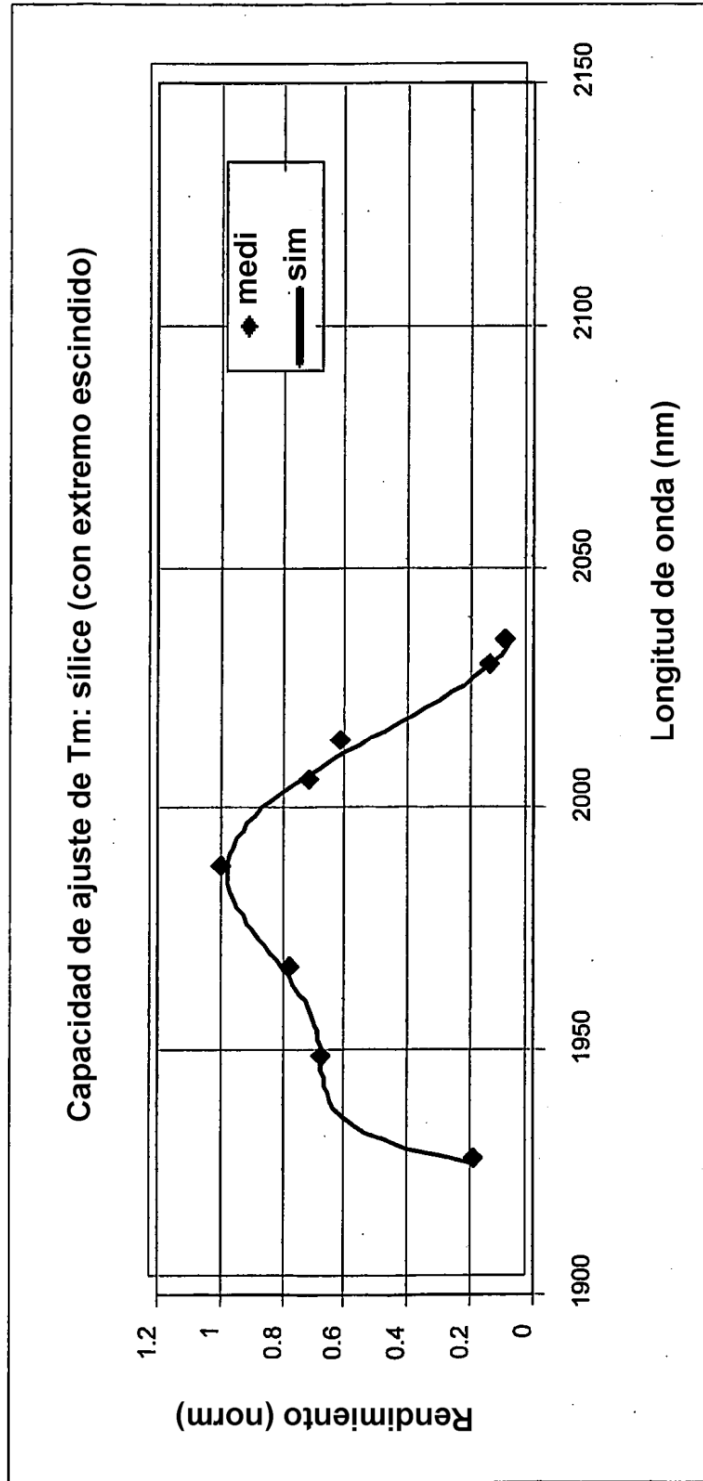


FIG. 9

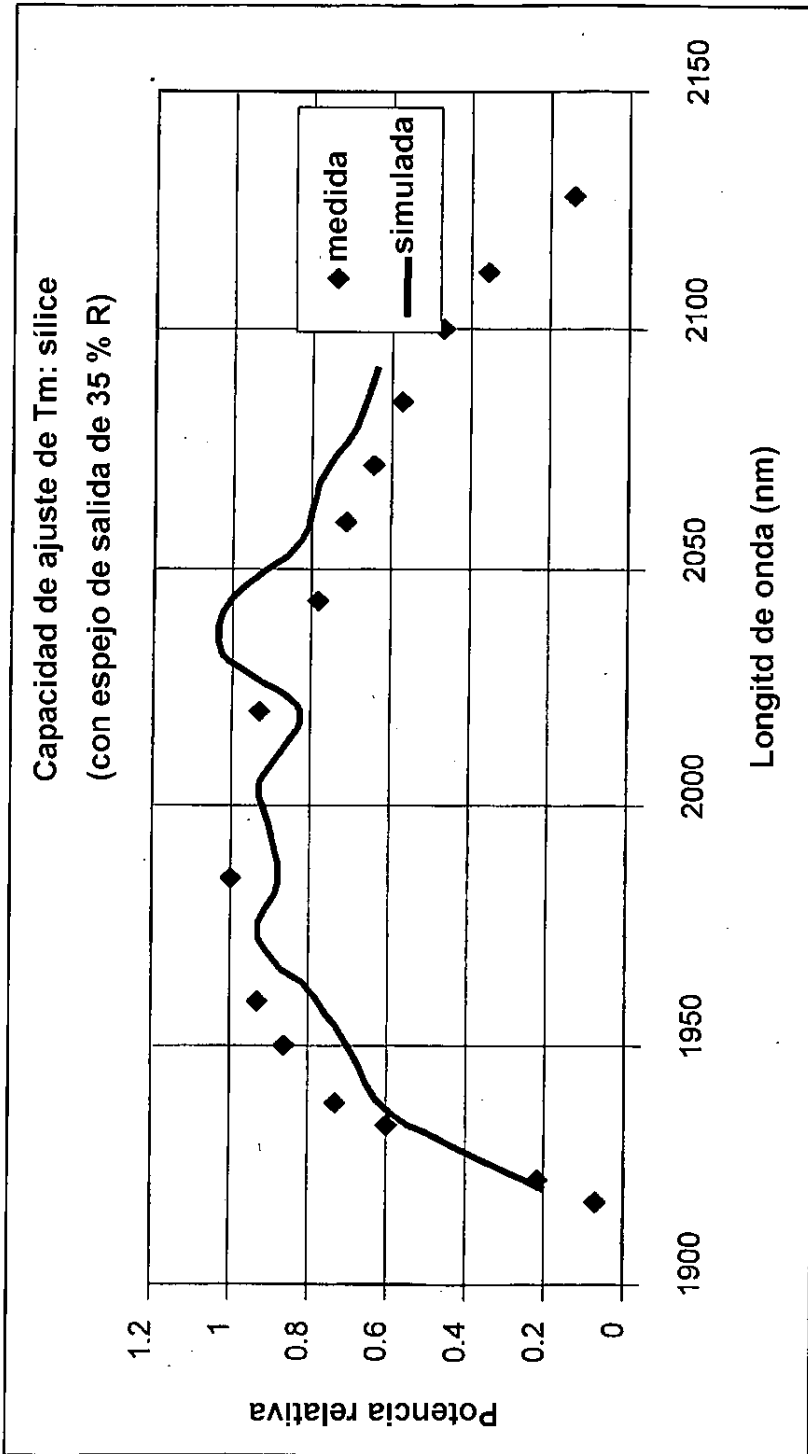


FIG. 10

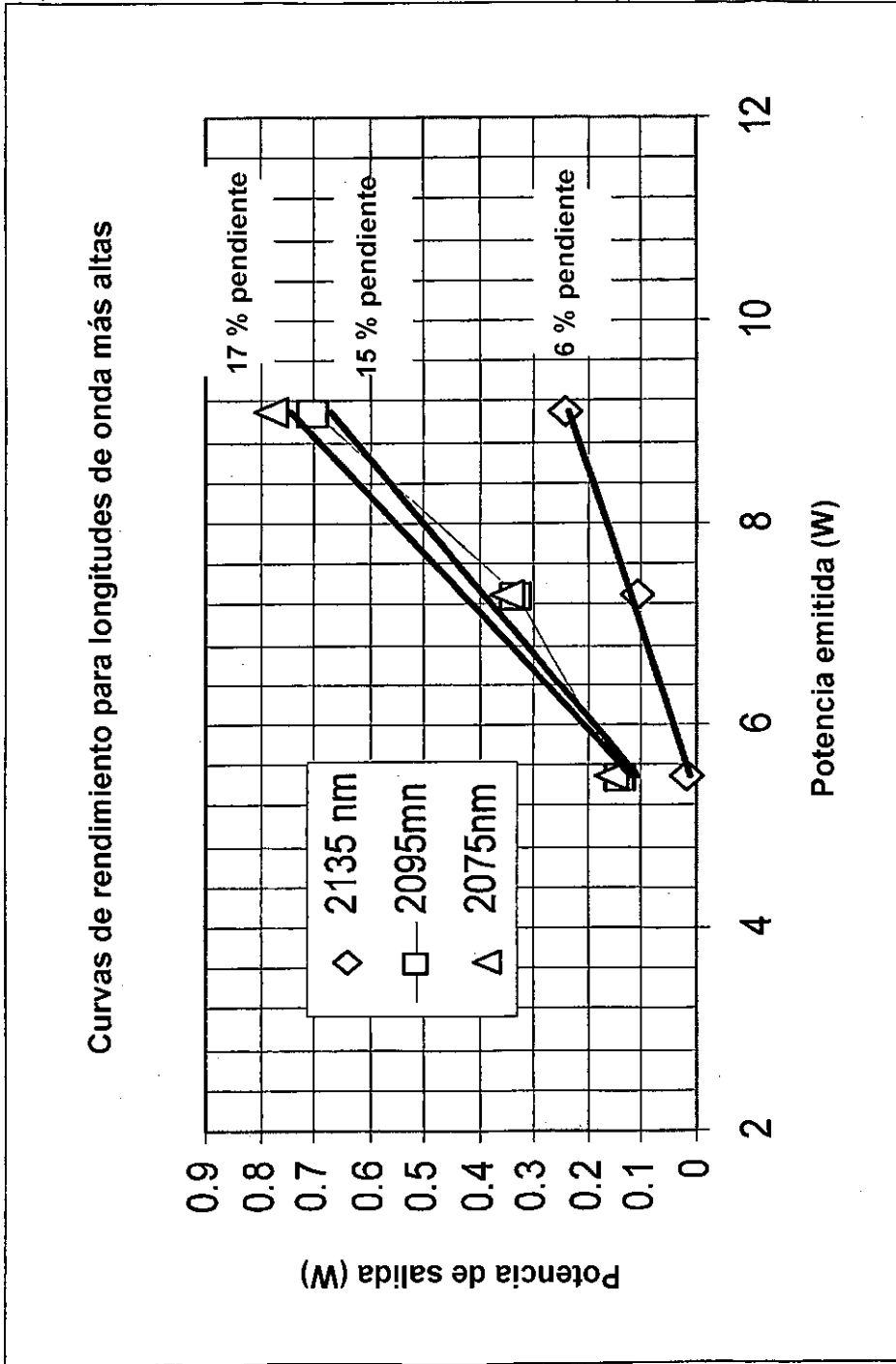


FIG. 11

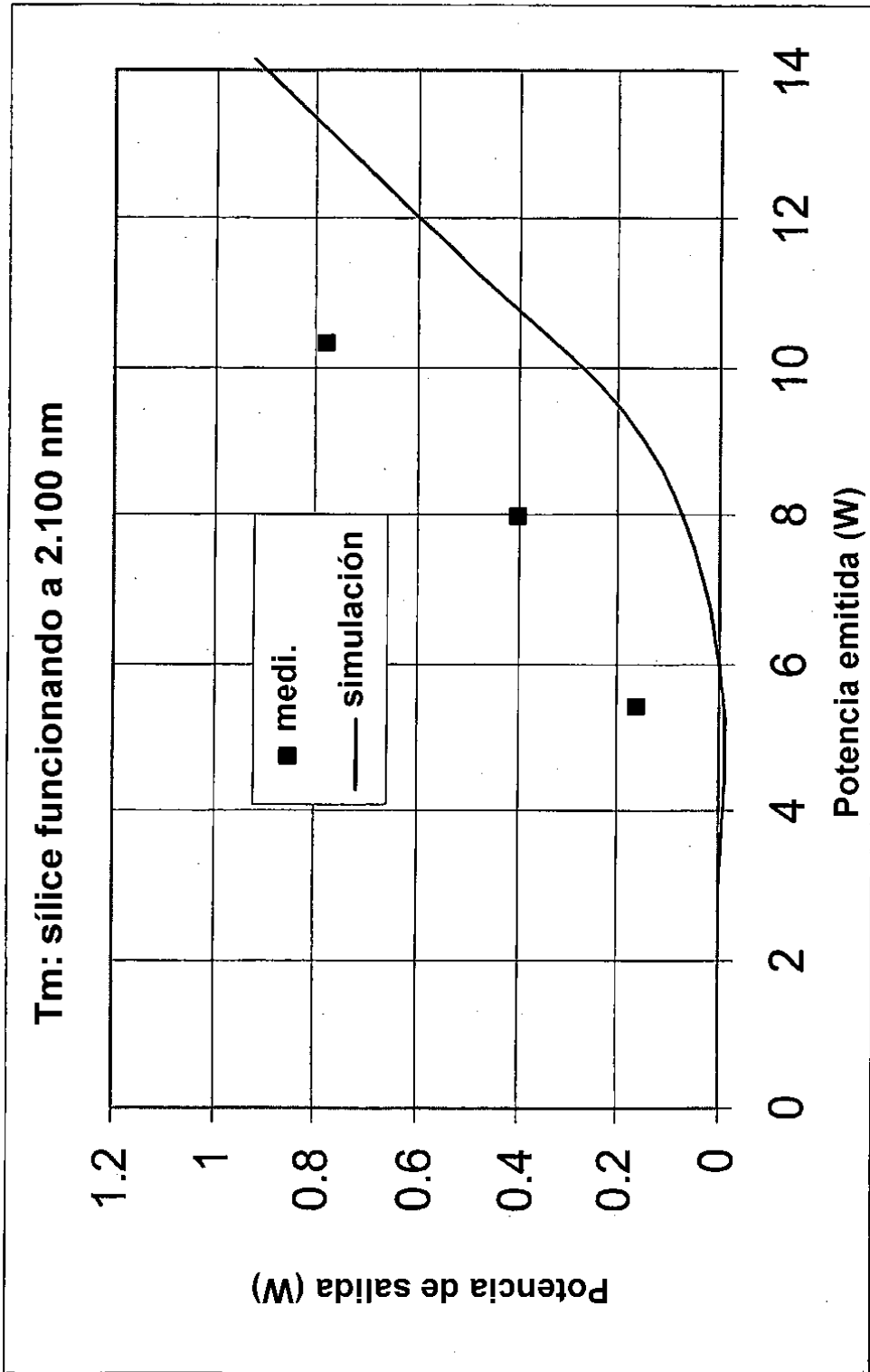


FIG. 12

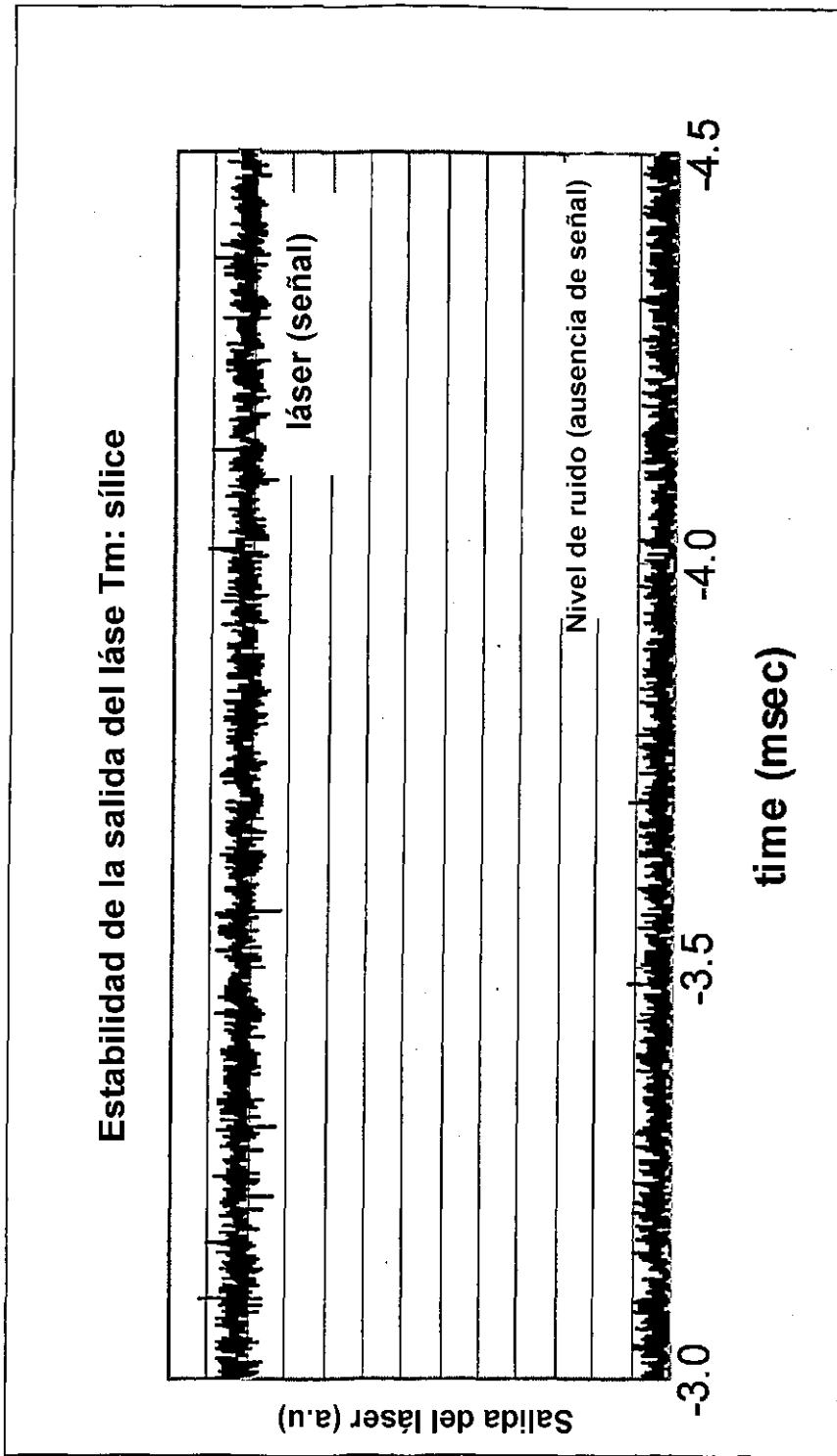


FIG. 13

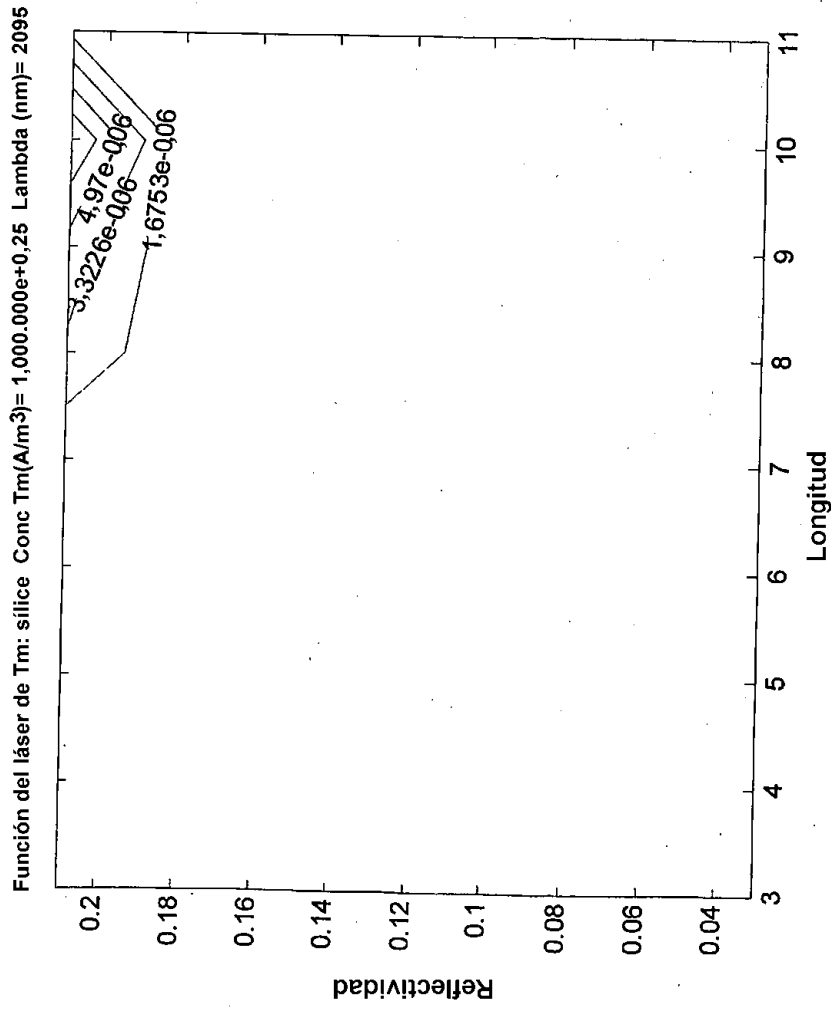


FIG. 14A

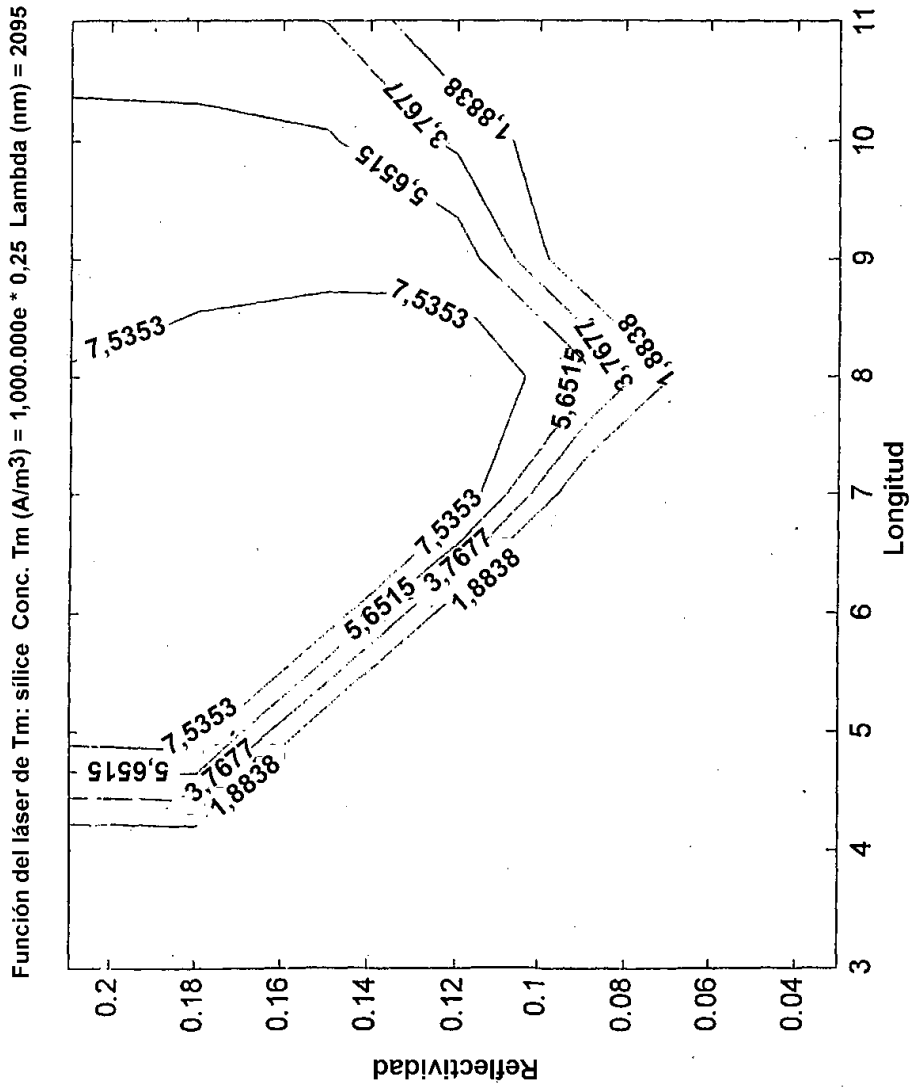


FIG. 14B

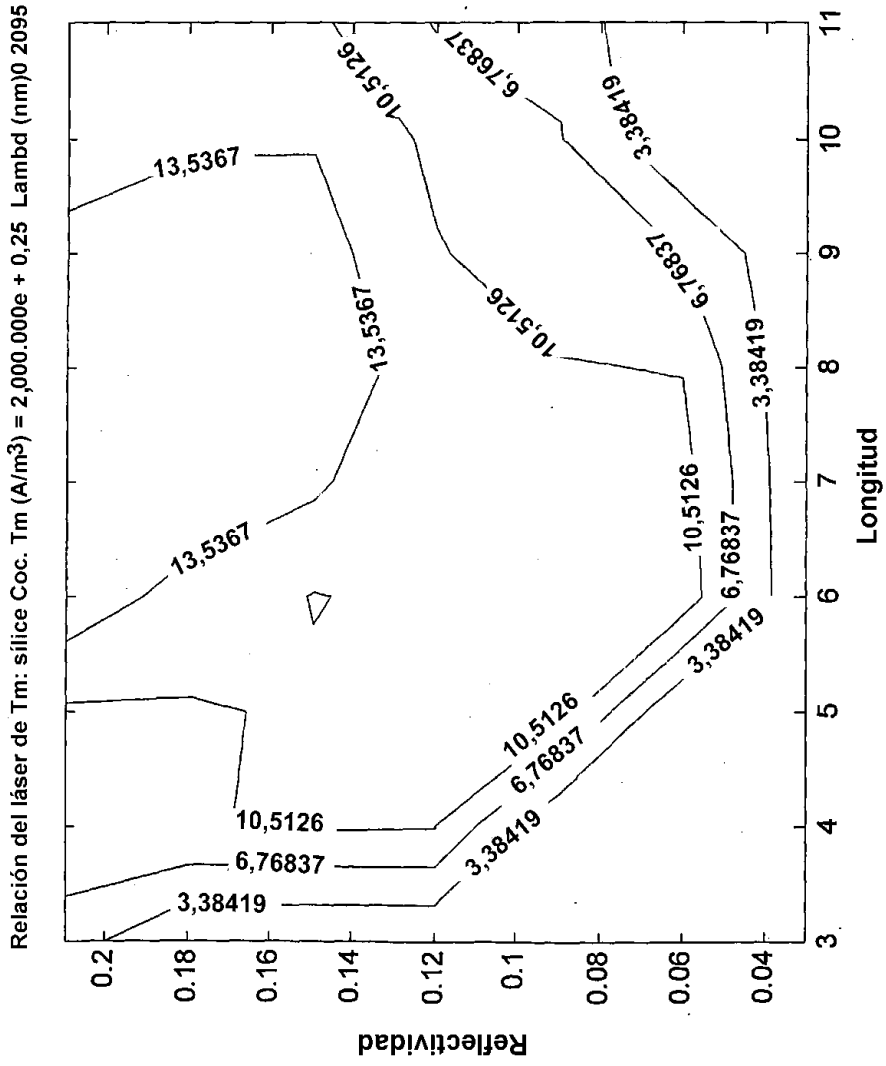


FIG. 14C

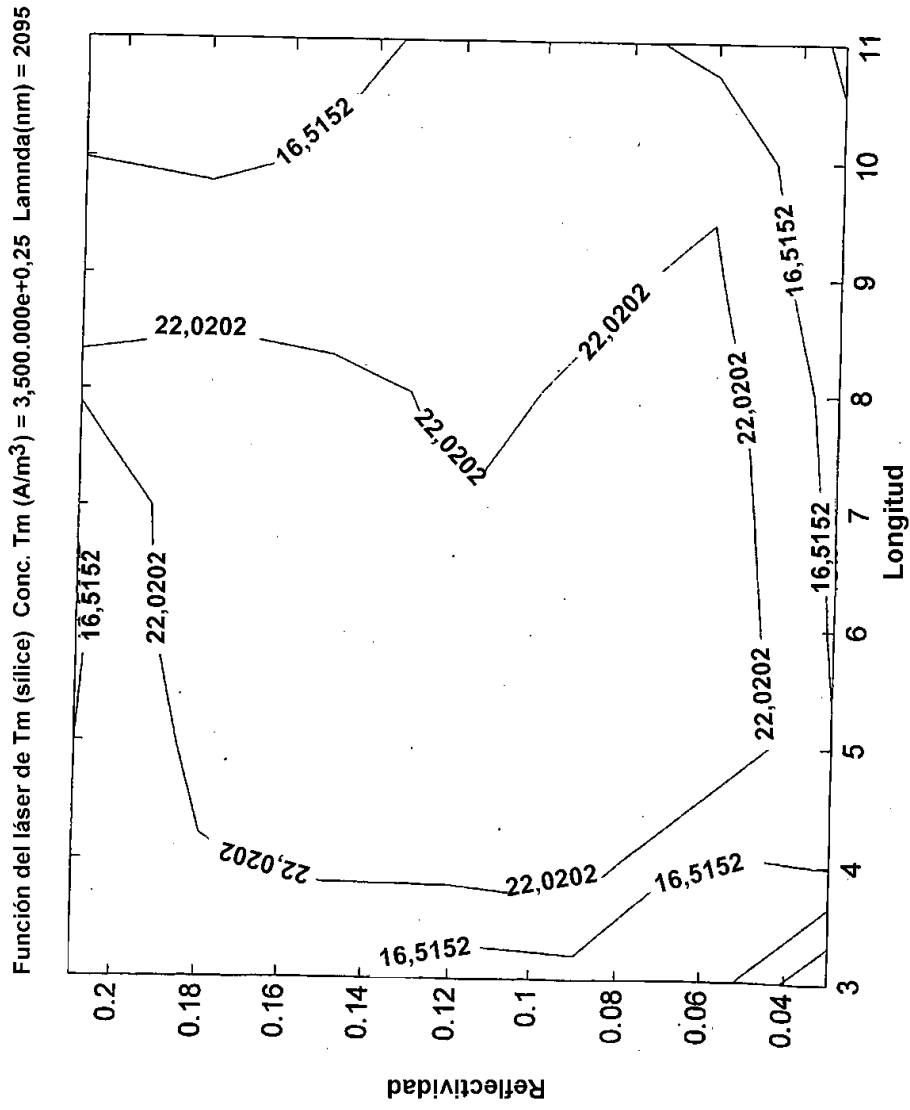


FIG. 14D

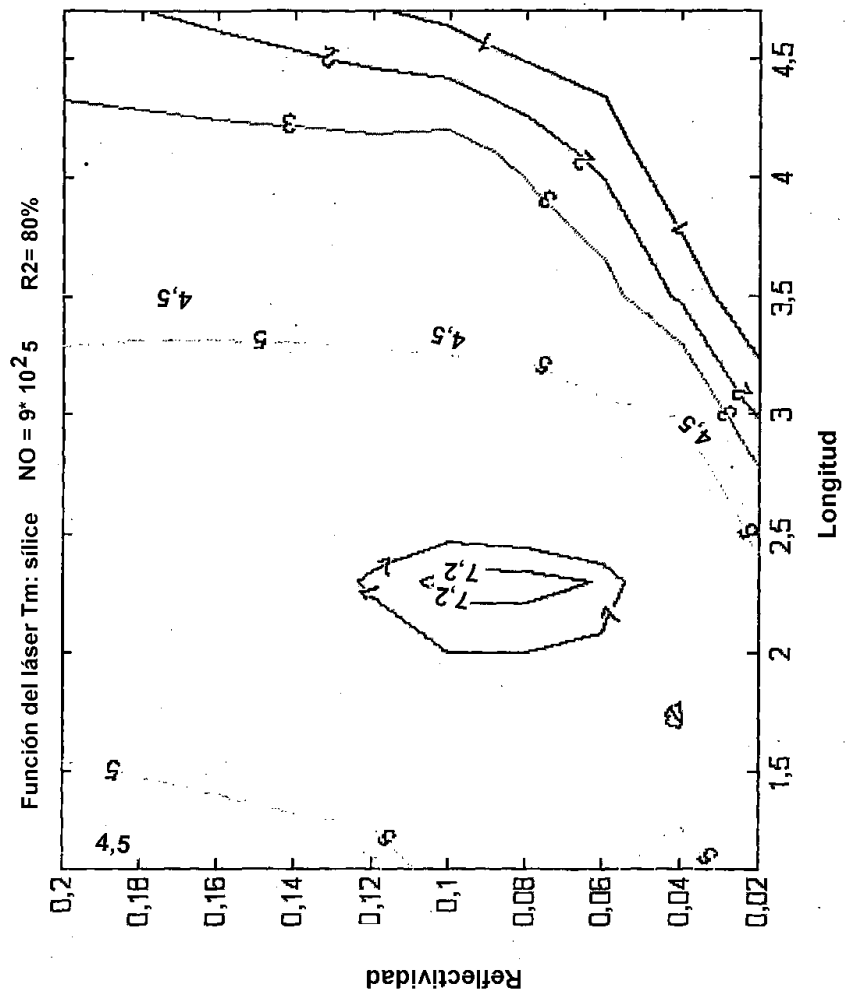


FIG. 15

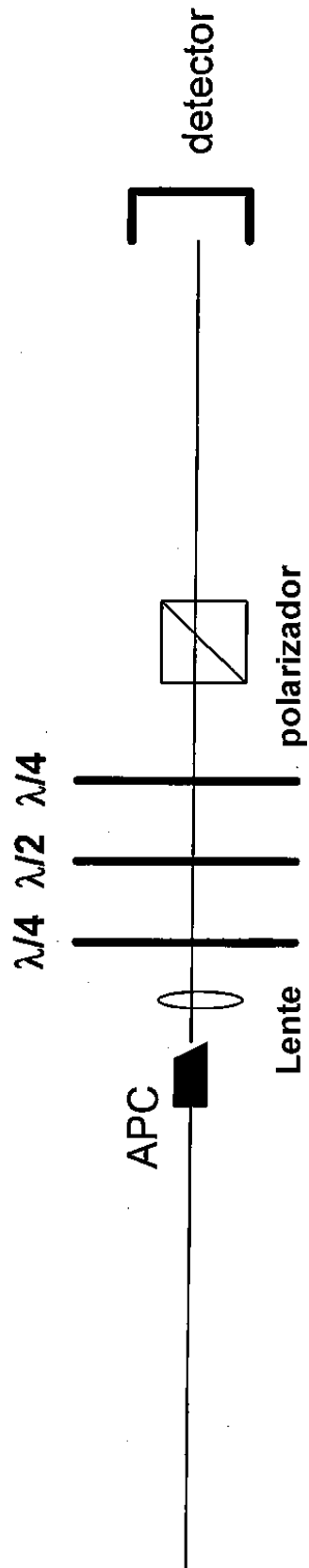


FIG. 16

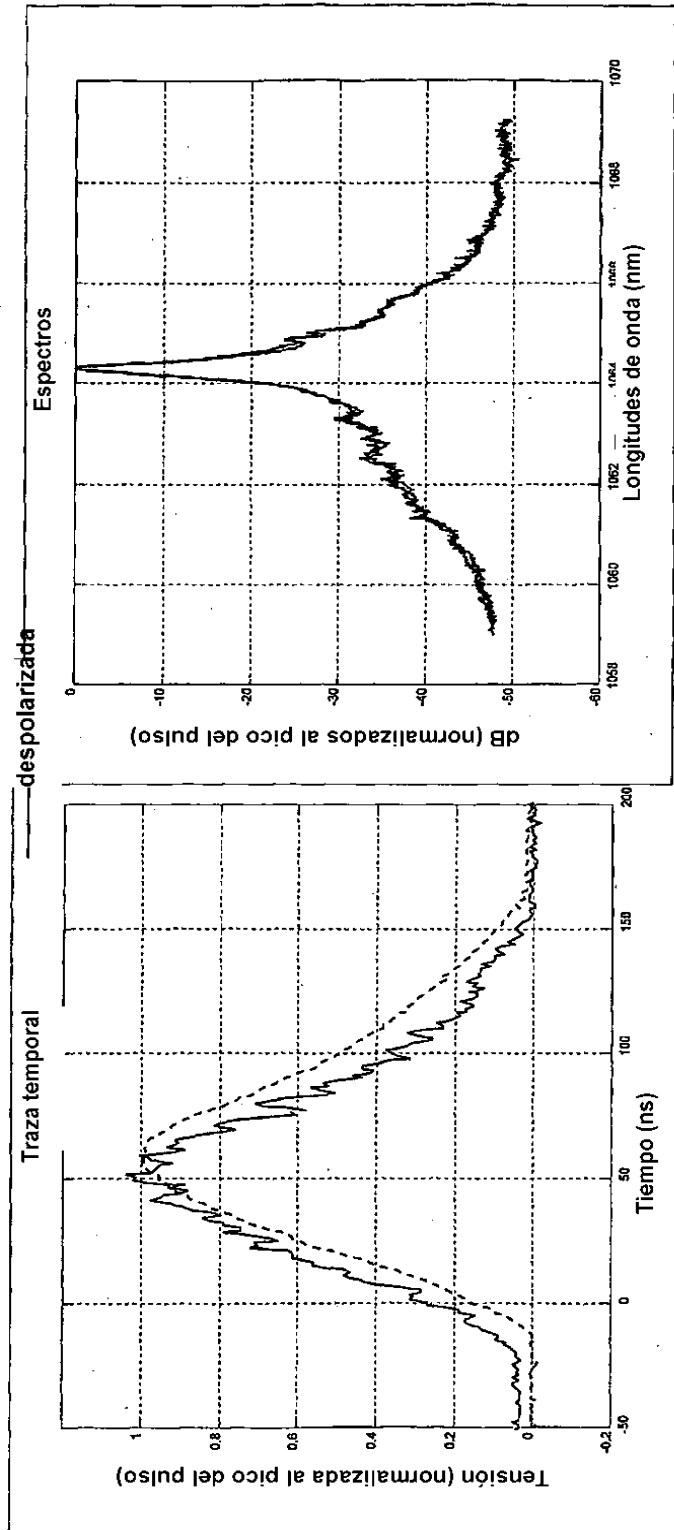


FIG. 17A

FIG. 17B

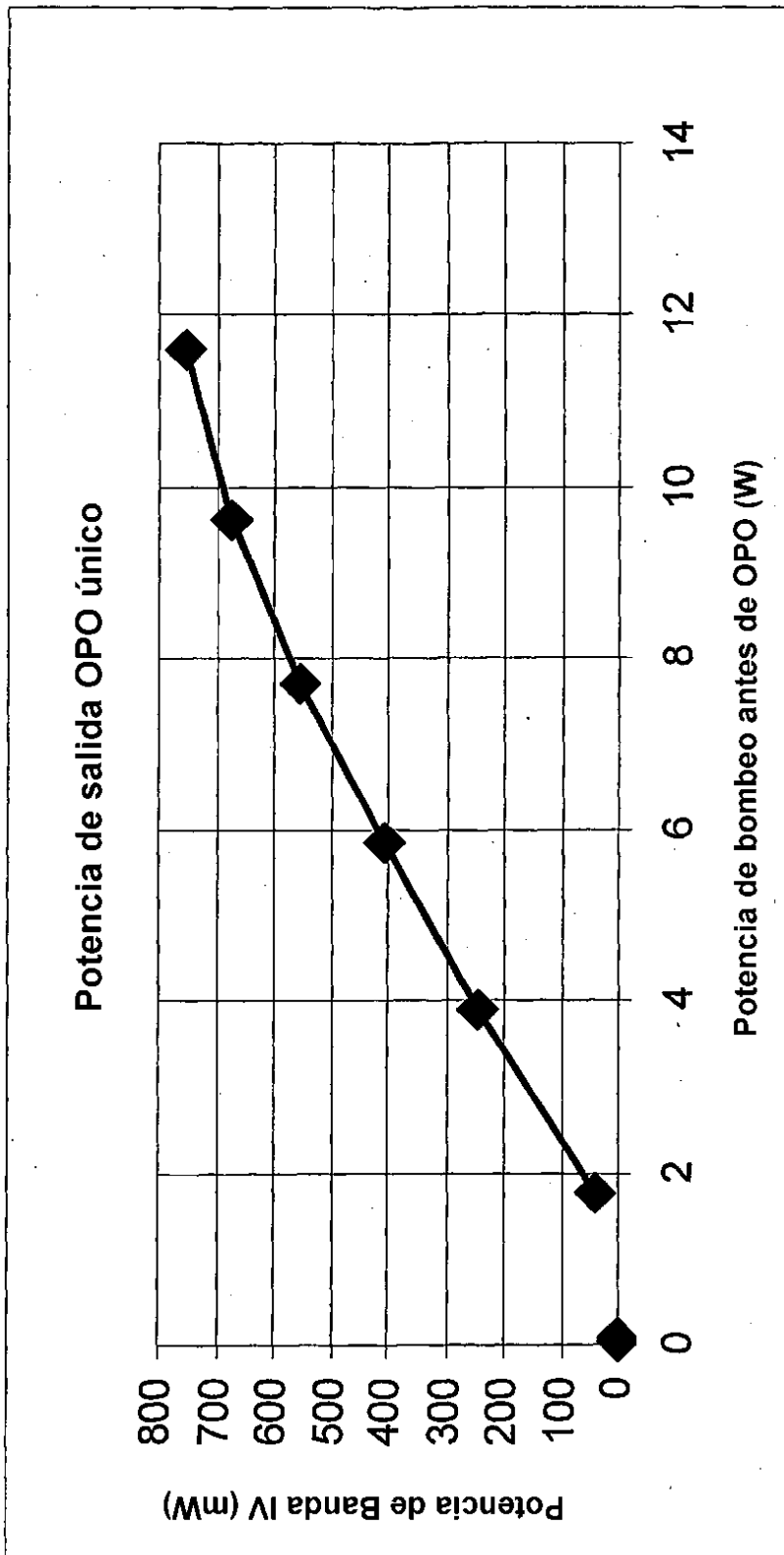
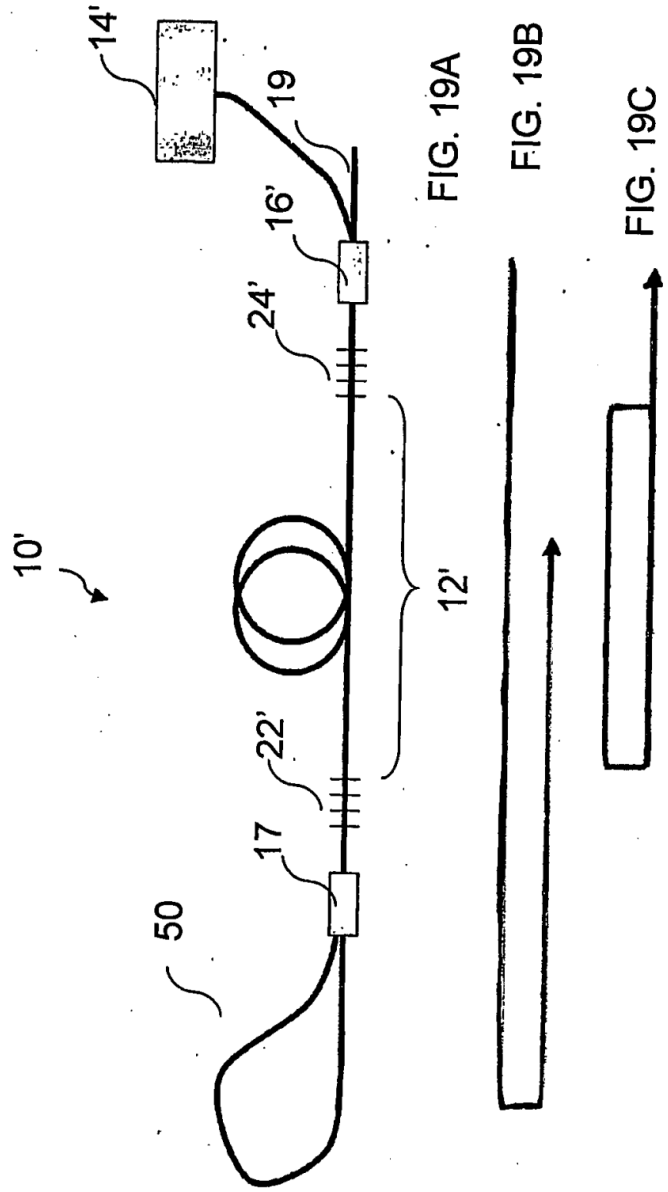


FIG. 18



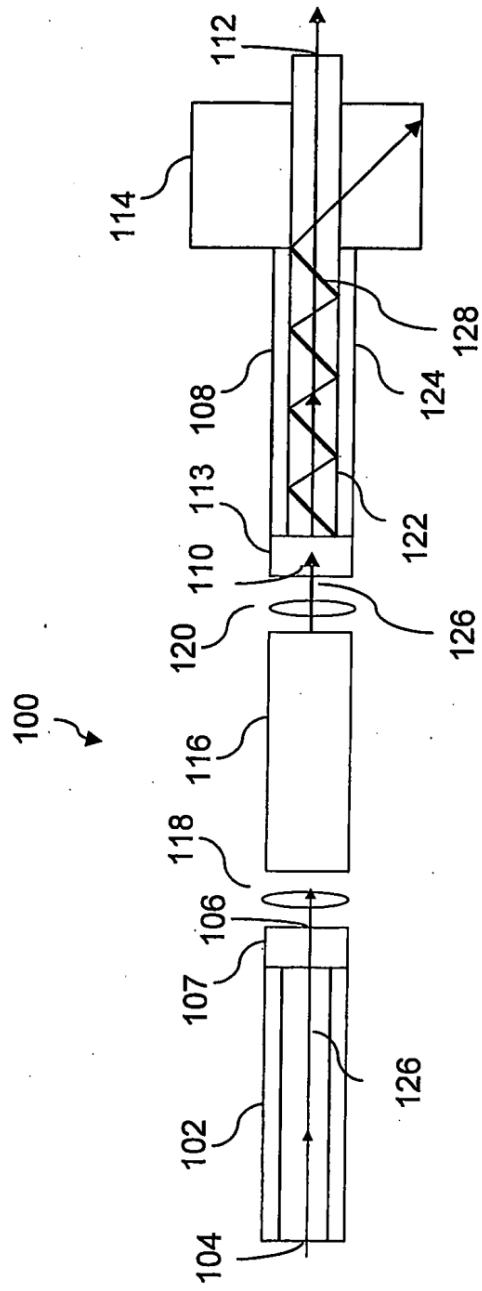


FIG. 20

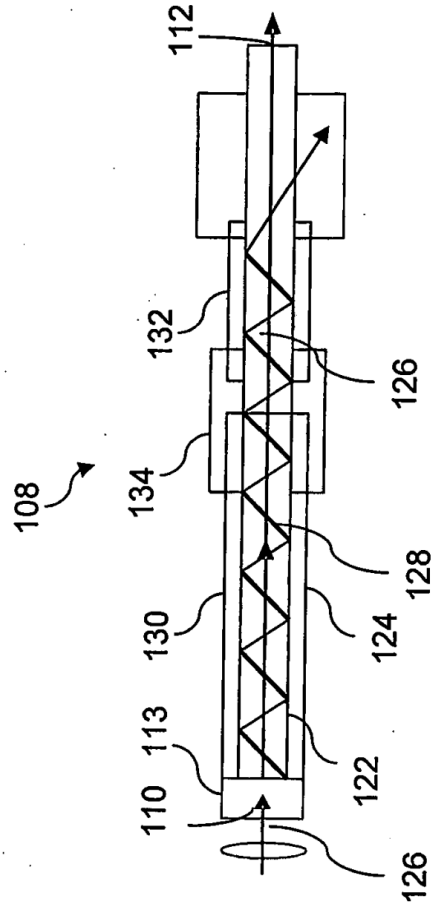


FIG. 21