

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 886 515**

51 Int. Cl.:

**H01S 3/06** (2006.01)  
**H01S 3/094** (2006.01)  
**H01S 3/131** (2006.01)  
**H01S 3/23** (2006.01)  
**H01S 3/16** (2006.01)  
**G02F 1/35** (2006.01)  
**H01S 3/00** (2006.01)  
**H01S 3/08** (2006.01)  
**H01S 3/10** (2006.01)  
**H01S 3/113** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.11.2014** **E 14193731 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **23.06.2021** **EP 2879249**

54 Título: **Sistema láser**

30 Prioridad:

**28.11.2013 US 201361910043 P**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**20.12.2021**

73 Titular/es:

**CANDELA CORPORATION (100.0%)**  
**530 Boston Post Road**  
**Wayland, MA 01778, US**

72 Inventor/es:

**BHAWALKAR, JAYANT D.;**  
**SHANG, XIAOMING;**  
**QIU, JINZE;**  
**JONES, CHRISTOPHER J. y**  
**HSIA, JAMES**

74 Agente/Representante:

**CONTRERAS PÉREZ, Yahel**

**Observaciones:**

**Véase nota informativa (Remarks, Remarques o Bemerkungen) en el folleto original publicado por la Oficina Europea de Patentes**

ES 2 886 515 T3

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

## DESCRIPCIÓN

## Sistema láser

- 5 La presente descripción se refiere a sistemas láser y procedimientos relacionados. En particular, la presente descripción se refiere a sistemas láser y procedimientos relacionados para su uso, por ejemplo, en la generación de pulsos de sub-nanosegundos de alta energía.

## ANTECEDENTES

- 10 Los láseres se utilizan en numerosas aplicaciones en la industria, la investigación y la medicina. Son de especial interés los láseres que generan pulsos de alta energía y corta duración, por ejemplo, pulsos de nanosegundos y sub-nanosegundos. Dichos láseres facilitarían aplicaciones de micro-procesamiento de algunos materiales de precisión. Dichos láseres también podrían abordar una serie de aplicaciones científicas y tecnológicas, así como determinados procedimientos médicos, en los que el reducido tiempo de interacción con la pieza de trabajo o tejido puede reducir efectos de calentamiento y mejorar la calidad de la interacción.

- 15 Los láseres de estado sólido por conmutación Q se utilizan actualmente para generar pulsos de láser de corta duración. Estos pulsos típicos podrían tener duraciones cortas tal como de unos pocos nanosegundos, aunque existen informes de pulsos más cortos que se han probado en condiciones de laboratorio. Un tipo especial de láser por conmutación Q, comúnmente denominados láseres microchip, que tienen resonadores muy cortos (de pocos milímetros) pueden generar pulsos de sub-nanosegundos. Sin embargo, estos dispositivos normalmente sólo pueden proporcionar energías de pulso de menos de 1 milijulio (mJ).

- 20 Los sistemas de amplificador de potencia de oscilador maestro (MOPA) también se utilizan para generar pulsos láser de alta energía de sub-nanosegundos. Por lo general, un MOPA incluye dos láseres de bombeo con un láser de bombeo bombeando el oscilador maestro y el otro láser de bombeo bombeando el amplificador de potencia. Para que el MOPA funcione correctamente, las fuentes de bombeo deben estar estrechamente sincronizadas. Sin embargo, la sincronización requiere complicados sistemas electrónicos.

- 30 Los sistemas de MOPA, especialmente los que tienen una alta ganancia de amplificador, son sensibles a reflejos parásitos, que pueden provocar problemas de auto-emisión láser. La auto-emisión láser puede limitar severamente la amplificación que puede obtenerse en el amplificador de potencia. La sensibilidad de retroalimentación de estos reflejos parásitos generalmente se resuelve únicamente colocando un aislador de Faraday entre el oscilador maestro (MO), también denominado a veces láser semilla, y el amplificador de potencia (PA), también denominado a veces amplificador. Particularmente para dispositivos pulsados de alta potencia, esto puede introducir serias limitaciones. Además, la complejidad y el coste de estos sistemas de MOPA son elevados y la energía de salida suele ser baja.

- 40 La ganancia que puede obtenerse en un amplificador de potencia a menudo está severamente limitada por una emisión espontánea amplificada (ASE). Las ganancias superiores a las limitadas por la ASE generalmente se logran mediante el uso de amplificadores de potencia que tienen múltiples etapas con aislamiento óptico entre las etapas. Esto puede complicar todavía más el diseño de los amplificadores de potencia y aumentar su coste.

Se hace referencia a los siguientes documentos:

- 45 D1: Peuser: "Compact, passively Q-switched, all solid-state master oscillator-power amplifier-optical parametric oscillator (MOPA-OPO) system pumped by a fiber-coupled diode laser generating high brightness, tunable, ultraviolet radiation", APPLIED OPTICS, vol. 48, nº 19, 1 de julio de 2009, páginas 3839-3845;  
 D2: DE 10 2010 045184 A1 (EADS) 15 de marzo de 2012  
 50 D3: US 2012/312267 A1 (Ridderbusch) 13 de diciembre de 2012  
 D4: Bernstein: "Treatment of tattoos with a 755-nm Q-switched alexandrite laser and novel 1064 nm and 532 nm Nd:YAG laser handpieces pumped by the alexandrite treatment beam", Journal of Drugs in Dermatology, vol. 9, nº 11, 1 de noviembre de 2010  
 D5: US 2009/227995 A1 (Bhawalkar) 10 de septiembre de 2009  
 55 D6: US 2005/265678 A1 (Manyam) 1 de diciembre de 2005  
 D7: US 6 295 161 B1 (Bazzocchi) 25 de septiembre de 2001  
 D8: P.G. Gobbi y otros: "Novel unstable resonator configuration with a self-filtering aperture: experimental characterization of the Nd:YAG loaded cavity", APPLIED OPTICS, vol. 24, nº 1, 1 de enero de 1985 (01/01/1985), páginas 26-33;  
 60 D9: A.F. Vasil'ev et al: "Pulse-periodic Nd:YAIO3 laser with a phase-locked aperture under conditions of phase conjugation by stimulated Brillouin scattering", Soviet Journal of Quantum Electronics, American Institute of Physics, vol. 21, nº 5, 1 de mayo de 1991, páginas 494-497;  
 D10: US 4 575 849 A (CHUN) 11 de marzo de 1986.

Los documentos anteriores, D1, D2 y D3 describen sistemas de MOPA que incluyen un láser de bombeo configurado para suministrar un haz de láser de bombeo tanto al oscilador maestro por conmutación Q pasiva como al amplificador.

D4 y D5 describen láseres Nd: YAG por conmutación Q pasiva bombeados por un láser de alejandrita. D6 y D7 describen una fibra y un sistema de bombeo acoplado a la fibra en el que la fibra incluye un codificador de modo. D8 aborda el problema de puntos calientes en un láser con un resonador inestable. D9 y D10 describen sistemas de MOPA en los que el oscilador maestro comprende un resonador inestable.

## DESCRIPCIÓN

La invención se define en las reivindicaciones independientes adjuntas. En las reivindicaciones dependientes se dan realizaciones preferidas de la invención.

De acuerdo con la invención tal como se define por la reivindicación 1 adjunta, un sistema láser comprende:

- un láser semilla (104) configurado para emitir luz láser pulsada;
- un amplificador (108) configurado para recibir y amplificar la luz láser pulsada emitida por el láser semilla (104);
- un láser de bombeo (112) configurado para suministrar un haz de láser de bombeo tanto al láser semilla (104) como al amplificador (108);
- en el que el láser semilla comprende un medio de ganancia (304) y un conmutador Q pasivo (308), caracterizado por el hecho de que el láser semilla comprende, además, un resonador inestable (316, 332) configurado para evitar la aparición de puntos calientes en la luz láser pulsada.

De acuerdo con la presente descripción, tal como se describe ampliamente aquí, un aspecto de ejemplo de la presente descripción puede disponer un sistema láser de MOPA configurado para generar pulsos de láser de sub-nanosegundos de alta potencia con una energía de pulso de salida superior a 100 mJ. El sistema láser puede incluir un láser semilla configurado para emitir luz láser pulsada con energía de pulso superior a 5 mJ, un amplificador con una ganancia de menos de 100 configurado para recibir la luz láser pulsada emitida por el láser semilla y amplificarla. El uso de un láser semilla energético puede reducir el requisito de ganancia a menos de 100 en el amplificador, de modo que podría utilizarse un amplificador relativamente simple para generar energías de salida de hasta 5 J.

De acuerdo con otro aspecto de ejemplo, una selección cuidadosa de la longitud de onda de la fuente de bombeo, la concentración de dopaje y la longitud del medio de ganancia del láser semilla, la intensidad del haz de bombeo, el diámetro de la sección transversal de la región bombeada activa y/o el diámetro del medio de ganancia puede facilitar la obtención de una energía de salida superior a 5 mJ en el láser semilla de sub-nanosegundos. Esta selección de parámetros también puede ser útil para superar limitaciones que podría imponer una emisión espontánea amplificada.

El bombeo del láser semilla y el amplificador con un solo láser puede obviar la necesidad de fuentes de bombeo separadas y la necesidad de una sincronización electrónica de las fuentes de bombeo separadas.

En la invención, el láser de bombeo está configurado para proporcionar simultáneamente un haz de láser de bombeo tanto al láser semilla como al amplificador. En un ejemplo que no se reivindica, el láser de bombeo podría ser un láser de Alejandrita bombeado por una o más lámparas de destello, que pueden configurarse para generar energías de pulso superiores a 1 J con duraciones de pulso inferiores a 0,2 milisegundos (mseg) a 755 nm y bombear un MOPA de Nd: YAG configurado para generar una salida a una longitud de onda de 1064 nm. El haz de láser de bombeo emitido por el láser de bombeo único puede acoplarse a una fibra óptica multimodo y fibras ópticas multimodo similares para suministrar o conducir el haz de láser de bombeo al láser semilla y al amplificador. La longitud de las fibras ópticas multimodo que suministran energía de bombeo al láser semilla y al amplificador puede seleccionarse para codificar en modo la energía de bombeo para proporcionar una distribución de energía de bombeo homogénea a la salida de las fibras ópticas multimodo. Esto puede hacer que el láser semilla y el amplificador sean insensibles a fluctuaciones de la calidad del haz de salida en el láser de bombeo. El uso de un único láser de bombeo también puede soportar una sincronización automática del láser semilla y el amplificador.

En la invención, el láser semilla incluye un medio de ganancia configurado para emitir luz láser pulsada y un conmutador Q pasivo. El medio de ganancia de láser semilla puede ser una barra o placa corta de Nd: YAG. La longitud de la barra de Nd: YAG del láser semilla podría seleccionarse para que sea lo suficientemente larga para reducir la ganancia en la dimensión transversal y reducir la emisión espontánea amplificada. Además, la longitud de la barra de Nd: YAG del láser semilla podría seleccionarse para que sea lo suficientemente corta como para soportar la generación de pulsos de sub-nanosegundos. La concentración de Nd podría elegirse de modo que una parte

significativa del haz de láser de bombeo pueda absorberse en la barra. El diámetro de la sección transversal de la región bombeada en el láser semilla y la intensidad del haz de bombeo podrían seleccionarse para facilitar la generación de la energía de salida requerida mientras se minimizan los efectos de la ASE.

- 5 De acuerdo con la invención, el uso de un resonador inestable evita la aparición de puntos calientes en un haz de láser semilla. Un absorbedor saturable o un aislador óptico rotatorio de Faraday colocado entre el láser semilla y el amplificador puede prevenir una auto-emisión láser.

10 En algunos aspectos de ejemplo, que no se reivindican, el amplificador puede incluir una barra de Nd: YAG, una lente de acoplamiento que acople el haz de láser semilla a la barra de Nd: YAG y un espejo dicróico. El espejo dicróico puede configurarse para reflejar el haz de láser amplificado por el amplificador y transmitir un haz de bombeo generado por el único láser de bombeo. Para minimizar una emisión espontánea amplificada, la ganancia por unidad de longitud de la barra del amplificador puede mantenerse pequeña. En un ejemplo, que no se reivindica, la longitud de la barra de Nd: YAG puede ser mayor de 2 cm, preferiblemente mayor de 4 cm. También para 15 minimizar la emisión espontánea amplificada, la barra de Nd: YAG podría tener un diámetro significativamente mayor que el diámetro de la región bombeada dentro de las limitaciones impuestas por el coste de la barra. Preferiblemente, el diámetro podría ser superior a 1 cm. Esta relación entre el diámetro de la barra de Nd: YAG y el diámetro de la región bombeada puede minimizar la emisión espontánea amplificada que podría producirse por reflejos de la superficie cilíndrica de la barra de Nd: YAG.

20 En otro aspecto de ejemplo, que no se reivindica, el haz de láser semilla puede amplificarse en el amplificador en una sola pasada. El haz emitido de láser semilla y el haz de bombeo pueden contra-propagarse en la barra de Nd: YAG del amplificador. El amplificador puede emitir un haz de láser en un modo de pulso a una longitud de onda de 1064 nm con una energía de hasta 5 J por pulso. La duración del pulso puede ser de entre aproximadamente 10 pseg y aproximadamente 900 pseg. La ganancia en el amplificador es de aproximadamente 100 o menos.

Alternativamente, en un aspecto que no se reivindica, puede utilizarse una única fibra óptica para suministrar tanto el haz de láser de bombeo como el haz de láser semilla al amplificador. El uso de una única fibra óptica puede permitir una alineación óptica y un solapamiento espacial entre el haz de láser semilla y la región de ganancia bombeada en el dispositivo amplificador. En este caso, el haz de láser semilla y el haz de bombeo del amplificador pueden propagarse conjuntamente en el amplificador. Esta disposición también puede facilitar la colocación del dispositivo amplificador a distancia del láser semilla, por ejemplo, dentro del sistema de suministro de haz para llevar el haz de salida al material de trabajo o tejido objetivo. Esto puede eliminar la necesidad de un sistema de suministro de haz con espacio libre maniobrable, tal como un brazo articulado con múltiples espejos para llevar el haz de manera flexible al material de trabajo.

De acuerdo con un aspecto de ejemplo, que no se reivindica, el MOPA puede incluir por lo menos un sensor de energía configurado para detectar energía láser irradiada por el láser semilla y/o por el amplificador y un mecanismo electrónico. El mecanismo electrónico puede configurarse para asegurar un pulso de láser de salida único interrumpiendo la corriente de activación de la lámpara de destello en el láser de bombeo tras una detección óptica de un pulso de salida de por lo menos uno de un grupo del láser semilla y el amplificador.

De acuerdo con otro aspecto que no se reivindica, el sistema de MOPA también puede incluir segmentos de multiplicación de frecuencia y conformación de haz de láser de salida del MOPA. La óptica de conformación del haz de láser de salida del MOPA podría ser, por ejemplo, un sistema óptico galileano inverso. Podría utilizarse otro sistema óptico configurado para facilitar la formación en el material de trabajo de un punto láser de aproximadamente entre 3 mm y 6 mm. Podría utilizarse un absorbedor saturable, tal como un absorbedor de Cr: YAG, para evitar el modo de funcionamiento de auto-emisión láser y minimizar la ASE que podría producir los reflejos del material de trabajo. En la óptica de modelado del haz de salida del MOPA o en el sistema de suministro de haz también podría utilizarse un elemento óptico reflectante desalineado, tal como un espejo parabólico de 90 grados para minimizar la luz reflejada que vuelve al amplificador.

Opcionalmente, la óptica de conformación del haz de láser de salida del MOPA podría incluir por lo menos un dispositivo de duplicación de la frecuencia del haz de láser configurado para recibir el haz de láser de salida con una longitud de onda de 1064 nm y duplicar la frecuencia para producir un haz de láser de salida con una longitud de onda de 532 nm.

Podría utilizarse una fibra óptica para acoplar el haz de láser semilla al amplificador. El acoplamiento de fibra óptica puede soportar la ubicación remota del amplificador junto con los componentes conformación y multiplicación de frecuencia del haz de láser de salida.

## BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

La figura 1 es una ilustración esquemática de un sistema láser de MOPA de acuerdo con un ejemplo de la presente descripción;

La figura 2 es una ilustración esquemática de un segmento de láser de bombeo único de un sistema láser de MOPA de acuerdo con la invención;

La figura 3 es una ilustración esquemática de un segmento de láser semilla del sistema láser de la figura 2 de acuerdo con la invención;

La figura 4 es una ilustración esquemática de un ejemplo de un segmento de dispositivo amplificador del sistema láser de la figura 2;

La figura 5 es una ilustración esquemática de un segmento de multiplicación de frecuencia y conformación de haz de salida de MOPA de acuerdo con un ejemplo, que no se reivindica;

La figura 6 es una ilustración esquemática detallada de un segmento de láser de bombeo único de un sistema láser de acuerdo con la invención;

La figura 7 es una ilustración esquemática de un ejemplo de un diseño óptico de un sistema láser de MOPA; y

La figura 8 es una ilustración esquemática de un ejemplo de un diseño óptico alternativo de un sistema láser de MOPA.

## DESCRIPCIÓN DE LAS REALIZACIONES DIVULGADAS

A continuación, se hará referencia en detalle a unos ejemplos útiles para comprender la invención y a las realizaciones de ejemplo de la invención, cuyos ejemplos se ilustran en los dibujos adjuntos. Siempre que sea posible, se utilizarán los mismos números de referencia en todos los dibujos para hacer referencia a partes iguales o similares.

Las figuras 1-8 ilustran varios ejemplos de un láser de sub-nanosegundos de alta energía. El término "láser de sub-nanosegundos de alta energía", tal como se utiliza aquí, puede referirse a un láser que puede proporcionar una energía de 0,1 a 10 J con una duración de pulso de 10 a 900 pseg. En general, un láser de sub-nanosegundos de alta energía puede permitir, por ejemplo, un micromecanizado, una espectroscopia científica, y tratamientos médicos más efectivos que un láser de nano-segundos comúnmente utilizado. En consecuencia, la disponibilidad de un láser de sub-nanosegundos de alta energía puede facilitar la mejora de las aplicaciones existentes y soportar el desarrollo de nuevas aplicaciones del láser.

Los láseres microchip se utilizan con frecuencia para "sembrar" los dispositivos amplificadores. Normalmente, la ASE limita la salida de un láser microchip a menos de 1 mJ. La disponibilidad de un láser microchip con una energía de salida superior a 5 mJ en el láser semilla de sub-nanosegundos podría soportar un aumento de la energía del láser semilla y contribuir a la reducción de la ganancia del amplificador.

La figura 1 es una ilustración esquemática de un sistema láser de sub-nanosegundos de alta energía 100 de acuerdo con un ejemplo de la presente descripción. El sistema láser 100 es generalmente un sistema MOPA que comprende un láser semilla 104, un dispositivo de amplificación o amplificador 108 y un láser de bombeo 112. El láser semilla 104 puede configurarse para emitir luz láser pulsada al amplificador 108. El amplificador 108 puede configurarse para amplificar la luz láser pulsada recibida del láser semilla 104. El láser de bombeo 112 puede ser un láser de estado sólido configurado para bombear un haz de láser tanto al láser semilla 104 como al amplificador 108. En la invención, el láser de bombeo 112 proporciona el haz de láser de bombeo simultáneamente al láser semilla 104 y al amplificador 108. El número de referencia 116 indica un haz de láser de salida de MOPA.

La figura 2 es un esquema detallado de un segmento de láser de bombeo del sistema láser 100 de la figura 1. Tal como se muestra en la figura, el sistema láser 100 puede disponer una o más lámparas de destello 204 para bombear el láser de bombeo 112. El láser de bombeo 112 puede funcionar en modo pulsado y generar pulsos láser con energías superiores a 1 J y duraciones inferiores a 0,5 mseg. Normalmente, la duración del pulso puede estar en el rango de entre 100 y 200  $\mu$ seg.

En algunas realizaciones de ejemplo, el láser de bombeo 112 puede ser un láser de Alejandrita de estado sólido. El láser de bombeo 112 puede emitir un haz de láser de bombeo a una longitud de onda de aproximadamente 755 nm. El haz de láser de bombeo emitido por el láser de bombeo 112 se envía al láser semilla 104 y al amplificador 108 a través de una fibra óptica multimodo 208. El haz de láser de bombeo puede dividirse en dos haces mediante, por ejemplo, un divisor de haz 212. El divisor de haz 212 puede ser cualquier divisor de haz adecuado, tal como, por ejemplo, un divisor de haz de cubo, un reflector parcial, una placa de alto índice de refracción, y una unión de fibra. En una realización de ejemplo, el divisor de haz 212 puede ser una placa o ventana de zafiro sin recubrimiento. A esta longitud de onda, el zafiro tiene un alto índice de refracción de aproximadamente 1,8 - 1,76 y podría reflejar aproximadamente un 30% de la energía láser incidente. Los haces láser de bombeo divididos se envían al láser semilla 104 y al amplificador 108 a través de una lente de enfoque 216 asociada a una primera fibra óptica multimodo 232 y a una segunda fibra multimodo 234, respectivamente.

Si la salida del láser de bombeo está bien polarizada, como es el caso cuando el láser de bombeo es un láser de Alejandrita, el divisor de haz puede ser un divisor de haz de polarización. Un divisor de haz de polarización puede permitir una variación continua de la fracción del haz de láser de bombeo que va al láser semilla 104 y al amplificador 108. Por lo tanto, el uso del divisor de haz de polarización puede facilitar el ajuste de la energía de salida del sistema de MOPA.

Los pulsos de energía de bombeo generados o emitidos por el láser de alejandrita de bombeo de estado sólido 112 podrían configurarse para proporcionar pulsos de energía constantes. Dado que el ritmo del pulso de salida de un láser semilla por conmutación Q pasiva depende de la intensidad del haz de bombeo, puede utilizarse un atenuador de haz 228 para establecer la intensidad del haz de láser de bombeo que se envía al láser semilla, estableciendo así el ritmo del pulso de salida del láser semilla. En el caso de que sea deseable variar la energía de salida del sistema de MOPA, puede utilizarse un atenuador variable 228 para variar la intensidad del haz de bombeo suministrado al amplificador 108, variando así la amplificación y la energía del haz de salida del MOPA resultante. El atenuador variable 228 podría operarse manualmente o mediante un sensor de retroalimentación configurado para ajustar el haz de láser de bombeo conducido a por lo menos uno de entre el láser semilla 104 o el amplificador 108 para mantener la energía de salida de pulsos del sistema de MOPA al nivel deseado.

Si se utiliza láser de alejandrita como láser de bombeo 112, el láser de bombeo 112 podría emitir un haz de láser que incluya una pluralidad de modos transversales o lo que generalmente se denomina funcionamiento multimodo. El funcionamiento multimodo del láser de bombeo 112 podría provocar que la calidad del haz de láser de salida fluctúe durante un solo pulso o de pulso a pulso. Tales fluctuaciones en la calidad del haz podrían tener efectos perjudiciales sobre el funcionamiento estable del láser semilla 104 y el amplificador 108. Las fibras multimodo empleadas para acoplar el haz de láser de bombeo al láser semilla 104 y el amplificador 108 pueden compensar ésta y algunas otras deficiencias del láser de bombeo, tales como faltas de uniformidad de intensidad espacial.

La longitud de la fibra óptica multimodo 232 y 234 que suministra el haz de láser de bombeo al láser semilla 104 y al amplificador 108 podría seleccionarse para codificar en modo (a través de mezcla de modo en la fibra óptica) el haz emitido por el láser de bombeo de manera que proporcione una energía 220 y/o una distribución 224 de bombeo homogénea a la salida de las fibras ópticas multimodo 220 232 y/o 234. Dicha distribución homogénea de la energía del láser de bombeo haría que los haces láser de bombeo suministrados al láser semilla de bombeo 104 y al amplificador 108 fueran insensibles a fluctuaciones de la calidad del haz de salida en el láser de bombeo. El bombeo de láser semilla 104 y el amplificador 108 mediante haces de bombeo homogeneizados puede dar como resultado una ganancia uniforme en el láser semilla 104 y el amplificador 108 y un funcionamiento estable del sistema de MOPA. El bombeo mediante un haz de láser de bombeo homogeneizado también proporciona un haz de salida de intensidad espacialmente uniforme sin "puntos calientes" y evita que variaciones en la calidad del haz de láser de bombeo afecten al funcionamiento del sistema láser de MOPA. Un espejo plegable 236 puede ser un espejo plano regular que se pliegue o dirija uno de los haces láser de bombeo para bombear, tal como se muestra, por ejemplo, en la figura 2, el amplificador 108. En otro ejemplo, los haces láser de bombeo podrían plegarse para bombear láser semilla 104 mientras que el haz transmitido por el divisor de haz 212 se dirige al amplificador de bombeo 108.

Los sistemas láser de MOPA con un solo láser de bombeo pueden ser menos costosos que los sistemas láser que tienen un láser de bombeo separado configurado para bombear el láser semilla y un láser de bombeo separado configurado para bombear el amplificador. Más importante aún, el uso de un solo láser de bombeo soporta una sincronización automática del láser semilla y el funcionamiento del amplificador, ya que el mismo pulso de láser de bombeo puede suministrar simultáneamente energía de bombeo al láser semilla y al amplificador. Esto puede simplificar todavía más la electrónica del producto final y reducir el coste del producto.

La figura 3 es una ilustración esquemática de un segmento de láser semilla del sistema láser 100 de acuerdo con la invención. El láser semilla 104 incluye por lo menos un medio de ganancia 304 configurado para emitir luz láser pulsada y un conmutador Q pasivo 308. En algunas realizaciones de ejemplo, el medio de ganancia 304 puede ser una barra de Nd: YAG. Un conjunto de lentes 312 acopla el haz de láser de bombeo homogeneizado 224 y suministra el haz de láser de bombeo homogeneizado al láser semilla 104 y, en particular, a un medio de ganancia 304. El medio de ganancia 304 del láser semilla 104 podría ser una placa o barra de Nd: YAG que genere un haz de láser con una longitud de onda de aproximadamente 1064 nm. La longitud de ganancia del láser semilla 104 podría ser entre 2 mm y 10 mm. La longitud de ganancia del láser semilla 104 podría seleccionarse para que sea lo suficientemente larga para reducir la ganancia en la dimensión transversal y para reducir la emisión espontánea amplificada y lo suficientemente corta para soportar la generación de pulsos de sub-nanosegundos. En caso de que se utilice una barra, y con el fin de reducir la emisión espontánea amplificada debida a la reflexión de la superficie cilíndrica de la barra, el diámetro de la barra Nd: YAG podría seleccionarse para que sea por lo menos tres veces mayor que el diámetro la región de bombeo. El reflejo de la superficie cilíndrica puede reducirse todavía más de diversas maneras. Por ejemplo, haciendo rugosa la superficie de la barra y rodeando la barra con un material con un índice de refracción cercano al de las barras que contenga también un absorbedor de luz.

El espejo 316 puede ser altamente reflectante a la longitud de onda de 1064 nm y transparente a la longitud de onda de 755 nm. El espejo 332 puede ser un reflector parcial convexo a 1064 nm. El espejo 316 junto con el espejo 332 pueden formar un resonador inestable configurado para evitar la aparición de puntos calientes en el haz de salida 104 del láser semilla. Puede utilizarse un absorbedor saturable 308, tal como una placa de Cr: YAG, como conmutador Q pasivo para generar una salida de láser semilla por conmutación Q.

Para mantener la longitud del resonador (la distancia entre los espejos 316 y 332) lo más pequeña posible para generar pulsos de salida cortos, puede ser ventajoso unir por difusión el absorbedor saturable 308 a la barra láser 304 y depositar espejos 316 y 332 directamente sobre las superficies frontales de la barra láser 304.

Entre el láser semilla 104 y el amplificador 108 puede colocarse un absorbedor saturable 324. El absorbedor saturable 324 puede estar configurado para evitar la auto-emisión láser en la cadena láser semilla-amplificador. El absorbedor saturable 324 podría ser, por ejemplo, un absorbedor saturable de Cr: YAG o cualquier equivalente del mismo. Alternativa o adicionalmente, también podría utilizarse un aislador óptico de Faraday.

Un absorbedor saturable es un componente óptico que absorbe la luz a bajos niveles de intensidad de luz. A altos niveles de intensidad de luz, un absorbedor saturable deja de absorber luz y se vuelve esencialmente transparente después de absorber inicialmente una cantidad de luz para que se sature. Puede insertarse un absorbedor saturable entre un láser semilla y un amplificador para evitar la auto-emisión láser en la cadena láser semilla-amplificador. Antes de que el láser semilla genere su pulso de láser por conmutación Q pasiva, el absorbedor saturable puede aislar eficazmente el láser semilla del amplificador evitando, de este modo, la auto-emisión láser. Entonces éste se vuelve esencialmente transparente y transmite el pulso de láser semilla cuando el pulso de láser semilla de alta intensidad incide sobre el mismo.

Un primer sensor de energía 328 puede detectar la energía del haz de salida del láser semilla y podría configurarse para proporcionar retroalimentación al láser de bombeo 112. Si el haz del láser de bombeo suministrado al láser semilla 112 no se interrumpe rápidamente, podría generarse un segundo pulso involuntario después del primer pulso. La generación de dicho pulso involuntario podría producir algunos efectos no deseados en el material moldeable que se está tratando. El sensor de energía 328 puede configurarse para detectar la salida del láser semilla 104 y desactivar la lámpara de destello 204 del láser de bombeo 112 inmediatamente cuando se detecta un pulso de salida del láser semilla, interrumpiendo inmediatamente, de este modo, la salida del láser de bombeo 112. Esto puede asegurar que no se emitan pulsos de salida. Una lente 332 envía el haz de láser 336 generado por el láser semilla 104 al amplificador 108. La energía del pulso de salida del láser semilla 104 puede ser de aproximadamente entre 5,0 mJ y 50,0 mJ. La lente 332 juega un papel doble. Es tanto un espejo como una lente. Ésta queda recubierta en la superficie frontal para que sea un reflector parcial convexo para formar el resonador láser junto con el espejo 316. También es una lente para la luz que lo atraviesa.

En algunas realizaciones de ejemplo, podría utilizarse un láser semilla bombeado por un láser de diodo. En esta configuración, podría seguirse utilizando un láser de Alejandrita para bombear el amplificador 108.

La figura 4 es una ilustración esquemática de un segmento amplificador del sistema láser 100 de acuerdo con una realización de ejemplo. El amplificador 108 puede incluir una barra de Nd: YAG 404, una lente de acoplamiento 408 configurada para acoplar el haz de láser 336 generado por el láser semilla 104 a la barra de Nd: YAG 404, y un espejo dicróico 412 configurado para reflejar un haz de láser 116 amplificado por el amplificador 108 y transmitir un haz de láser de bombeo 224 generado por láser de bombeo 112. El haz de láser semilla 336 puede amplificarse en el amplificador 108 en una sola pasada. En este caso, el haz de láser semilla 336 y el haz de láser de bombeo 224 pueden contra-propagarse en la barra de Nd: YAG del amplificador 108. Tal como se ha indicado anteriormente, en un ejemplo, el láser de bombeo 112 (figura 1) puede proporcionar energía de bombeo simultáneamente tanto al láser semilla 104 como al amplificador 108. El retardo en la emisión del haz de láser 336 por el láser semilla 104 es suficiente para permitir que la ganancia se acumule en la barra de Nd: YAG 404 del amplificador 108 para una amplificación óptima de los pulsos de energía láser generados por el láser semilla 104.

La barra de Nd: YAG 404 del amplificador 108 podría ser una barra láser de cerámica con una concentración de neodimio graduada para soportar el modo de operación de propagación conjunta, donde el haz de láser semilla 336 y el haz de láser de bombeo 224 se propagan en la misma dirección en el amplificador 108. Este modo de funcionamiento puede utilizarse en el caso en que el haz de bombeo de amplificador 336 y el haz de láser semilla 224 se envíen al amplificador 108 a través de la misma fibra. El uso de una sola fibra óptica podría soportar la alineación óptica y la superposición espacial entre el haz de láser semilla 336 y la región de ganancia bombeada en el dispositivo amplificador 108. En esta disposición, al tener la concentración de neodimio más alta hacia el extremo de salida de la barra 404, la ganancia puede aumentarse para compensar la disminución de la intensidad del haz de bombeo. El diámetro de la barra de Nd: YAG 404 podría ser significativamente mayor que el diámetro de la región bombeada de la barra de Nd: YAG 404, sin embargo, el coste de una barra de gran diámetro puede ser un problema. El diámetro de la barra puede ser de entre 1 y 1,2 mm. Este diámetro relativamente grande de la barra de

Nd: YAG 404 puede seleccionarse para minimizar la ASE provocada por reflejos de una superficie cilíndrica de la barra de Nd: YAG 404. La ASE también puede minimizarse haciendo que la superficie de la barra de Nd: YAG sea rugosa, o recubriendo la barra con un material que absorba luz en la longitud de onda de 1064 nm, y utilizando materiales absorbentes de luz de 1064 nm para fabricar la carcasa de la barra. El amplificador genera un haz de láser de salida 116 a una longitud de onda de 1064 nm. En algunas realizaciones de ejemplo, la emisión puede estar en un modo de pulso con una energía de pulso de láser de salida de entre 0,1 J y 5 J. La duración del pulso puede ser entre 10 pseg y 900 pseg. El valor de ganancia del amplificador puede ser entre 5,0 y 100,0 y, en algunos casos, puede superar el valor de 100,0.

En caso de que sea deseable que el haz de láser semilla y el haz de bombeo del amplificador se propaguen conjuntamente en la barra de Nd: YAG 404 como es el caso cuando el haz de láser semilla y el haz de bombeo del amplificador se envían al amplificador utilizando la misma fibra de suministro, la intensidad del haz de bombeo hacia el extremo de salida de la barra del amplificador 404 será menor debido a la absorción del haz de bombeo en la barra del amplificador y a la divergencia del haz de bombeo. Esto puede resultar en un extremo de salida de menor ganancia de la barra. En este caso, puede utilizarse una barra láser de cerámica con una concentración de neodimio graduada a lo largo de su longitud de modo que la concentración de neodimio pueda ser mayor en el extremo de salida que en el extremo de entrada de la barra. Esto aumentará la ganancia en el extremo de salida de la barra. El amplificador genera un haz de láser de salida 116 a una longitud de onda de 1064 nm. Normalmente, la emisión es en modo de pulso con una energía de pulso de láser de salida de entre 0,1 J y 5 J. La duración de los pulsos puede ser de entre 10 pseg y 900 pseg. El valor de ganancia de energía del amplificador puede ser entre 5,0 y 100,0 y, en algunos casos, podría superar el valor de 100,0.

El amplificador 108 puede incluir, además, un segundo sensor de energía láser 428 configurado para detectar la energía láser emitida por el amplificador 108. Tal como se muestra en la figura 4, el sensor de energía láser 428 puede detectar los pulsos de salida del amplificador y podría configurarse para proporcionar retroalimentación al láser de bombeo 112 o a un atenuador variable 228 y actuar para establecer una energía de bombeo adecuada para generar la energía de pulso de salida deseada.

Si el haz de láser de bombeo único suministrado tanto al láser semilla como al amplificador (al MOPA) no se interrumpe de inmediato, podría generarse un segundo pulso involuntario después del primer pulso generado por el MOPA. La generación de dicho pulso involuntario podría provocar algunos efectos no deseados en el material de trabajo 520 (véase la figura 5). Por ejemplo, en caso de un tratamiento de la piel, podría provocar un daño excesivo en la piel de un paciente. En caso de procesamiento de material, éste podría eliminar o añadir grosor de material no deseado. Puede configurarse un segundo sensor de energía láser 428 para detectar la salida del láser de MOPA y desconectar la lámpara de destello del láser de bombeo inmediatamente para evitar una generación involuntaria de un segundo pulso en un pulso de láser de bombeo.

La figura 4 también ilustra el segmento de láser de bombeo 108 del amplificador. Un sistema de lentes de relé que comprende lentes 420 y 436 puede configurarse para transportar y acoplar el haz de láser de bombeo 224 a la barra de Nd: YAG 404. Generalmente, el haz de bombeo del amplificador se proporciona en pulsos con una duración de aproximadamente 100 - 250 microsegundos y una energía de pulso en rango de entre 1 y 10 J. Puede configurarse un espejo dicróico 424 para transmitir el haz de láser de bombeo 224 con una longitud de onda de 755 nm y reflejar el haz de láser 116 generado por el amplificador 108 con una longitud de onda de 1064 nm.

La figura 5 es una ilustración esquemática de un segmento conformación y multiplicación de frecuencia del haz de láser emitido por el MOPA de acuerdo con una realización de ejemplo. El segmento puede incluir un sistema óptico galileano inverso 500 que comprende lentes 504 y 508 y un absorbedor saturable 512. El sistema óptico 500 puede configurarse para recibir y conformar a un diámetro deseado emitido por el haz de láser de salida de MOPA 116. El absorbedor saturable 512 se inserta en la trayectoria del haz de salida del MOPA. El absorbedor 512 podría ser un absorbedor de Cr: YAG y puede configurarse para minimizar la ASE y evitar el modo de funcionamiento de auto-emisión láser que podría ser provocado por reflejos del haz de láser de salida 116 de un material de trabajo 520. Podría utilizarse un brazo articulado para suministrar el haz de láser 116 generado por el MOPA al material de trabajo 520.

En algunas aplicaciones láser, podría desearse el uso de una longitud de onda de láser adicional. Un dispositivo de duplicación de frecuencia 516 opcional tal como, por ejemplo, un cristal KTP, puede configurarse para recibir el haz de láser de salida 116 con una longitud de onda de 1064 nm y duplicar la frecuencia para producir un haz de láser de salida con una longitud de onda de 532 nm. Generalmente, podría colocarse un dispositivo de duplicación de frecuencia adicional en la trayectoria del haz de láser de salida para producir un haz de láser de salida con una longitud de onda de 266 nm.

La figura 6 es una ilustración esquemática detallada de un segmento de láser de bombeo de un sistema láser, de acuerdo con una realización de ejemplo. En algunos casos, podría desearse, además de las longitudes de onda



indicadas anteriormente de 1064 nm, 532 nm y 266 nm, tener la posibilidad de utilizar longitudes de onda de energía láser adicionales. Podría insertarse un espejo plegable 604 opcional, que refleje por lo menos parcialmente a una longitud de onda de 755 nm, en la trayectoria óptica de láser de Alejandrita de bombeo 112. El espejo 604 podría montarse en una palanca que tenga dos posiciones, de modo que, cuando sea necesario, pueda introducirse en la trayectoria óptica del láser de Alejandrita 112 que emite a una longitud de onda de 755 nm y desvía, en la dirección deseada, parte o todo el haz de láser de bombeo 608. El haz de láser de bombeo desviado podría utilizarse directamente para fines adicionales, por ejemplo, para bombear uno o más dispositivos láser adicionales con diferentes características de salida para aplicaciones adicionales.

La figura 7 es una ilustración esquemática de un ejemplo de un diseño óptico de un sistema láser de MOPA. El sistema láser de la figura 7 ilustra todos los segmentos de láser de MOPA descritos anteriormente, incluyendo el láser de bombeo 112, dispuestos en una línea. Dicha disposición de los segmentos de láser de MOPA también puede reducir el número de componentes ópticos requeridos, pero podría ser de dimensiones relativamente largas y un empaquetado y uso complicados del sistema.

La figura 8 es una ilustración esquemática de un ejemplo de un diseño óptico alternativo de un sistema láser de MOPA. El sistema láser de la figura 8 incluye varios espejos plegables 804, 808 y 812. El uso de espejos plegables puede contribuir a una reducción significativa de las dimensiones en un sistema láser de MOPA. En algunos ejemplos, el haz de láser 336 generado por el láser semilla 104 podría acoplarse al amplificador 108 utilizando una fibra óptica multimodo 816. Podría introducirse un acoplamiento de lentes adecuado para recoger y acoplar el haz de láser generado por el láser semilla 104 en la fibra 816. El uso de fibra óptica para acoplar la salida del láser semilla 104 al amplificador 108 puede facilitar la colocación del amplificador 108 y/o el segmento de multiplicación de frecuencia y conformación del haz (figura 5) en una pieza manual de tratamiento. Esto puede simplificar todavía más la construcción del MOPA y eliminar la necesidad de un brazo articulado en el sistema de suministro de haz de láser generado por el MOPA.

Debe entenderse que el sistema de MOPA descrito anteriormente, en el que un láser de bombeo es un láser de Alejandrita bombeado por una lámpara de destello y un MOPA incluye un láser semilla de Nd: YAG y un amplificador de Nd: YAG, es solamente un ejemplo de un dispositivo que puede realizarse de acuerdo con los principios de la presente descripción. Podrían realizarse otras combinaciones de láser de bombeo y MOPA sin apartarse de las enseñanzas de la presente descripción. Por ejemplo, el láser de bombeo puede ser un láser de Nd: YAG de frecuencia duplicada que funcione con una salida de longitud de onda de 532 nm, y el MOPA puede incluir un láser semilla de Alejandrita y un amplificador de Alejandrita.

Otro ejemplo de una combinación de láser de bombeo y MOPA podría ser un láser de rubí, un láser de titanio y zafiro, un láser de Nd: YAG de frecuencia duplicada o un láser de Cr: LiSAF. El medio de ganancia MOPA podría ser cualquiera de los materiales láser conocidos que tienen bandas de bombeo en las longitudes de onda de los láseres de bombeo. Por ejemplo, el medio de ganancia de MOPA puede ser Alejandrita, y el láser de bombeo puede ser un láser de Nd: YAG de frecuencia duplicada. En este caso, la longitud de onda de salida del MOPA se encontrará en el rango cercano a los 750 nm.

## REIVINDICACIONES

### 1. Sistema láser que comprende:

- 5 un láser semilla (104) configurado para emitir luz láser pulsada;  
un amplificador (108) configurado para recibir y amplificar la luz láser pulsada emitida por el láser semilla (104);  
un láser de bombeo (112) configurado para suministrar un haz de láser de bombeo tanto al láser semilla (104)  
como al amplificador (108);
- 10 en el que el láser semilla comprende un medio de ganancia (304) y un conmutador Q pasivo (308), caracterizado por  
el hecho de que el láser semilla comprende, además, un resonador inestable (316, 332) configurado para evitar la  
aparición de puntos calientes en la luz láser pulsada.
- 15 2. Sistema láser de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por el hecho de que comprende, además, una o  
más fibras ópticas multimodo (208; 232, 234) para suministrar el haz de láser de bombeo al láser semilla (104) o al  
amplificador (108) o tanto al láser semilla (104) como al amplificador (108), seleccionándose la longitud de la fibra  
(208) o fibras (232, 234) ópticas multimodo para codificar en modo el haz de láser de bombeo para proporcionar una  
distribución de energía de bombeo homogénea a una salida de la fibra (208) o fibras (232, 234) ópticas multimodo.
- 20 3. Sistema láser de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por el hecho de que comprende, además, un  
atenuador variable (228) configurado para ajustar la energía del haz de bombeo conducida por lo menos al  
amplificador (108).
- 25 4. Sistema láser de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por el hecho de que el láser semilla (104)  
comprende dos espejos (316, 332) que forman el resonador inestable configurados para evitar la aparición de  
puntos calientes en el haz de salida del láser semilla.
- 30 5. Sistema láser de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por el hecho de que el láser semilla (104) tiene  
una longitud de ganancia en el rango de 2-10 mm.
- 35 6. Sistema láser de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por el hecho de que el láser semilla (104)  
comprende una barra de Nd: YAG (304) que tiene un diámetro por lo menos tres veces mayor que el de las  
dimensiones de la región bombeada para minimizar la emisión espontánea amplificada producida por reflejos de una  
superficie cilíndrica de la barra de Nd: YAG (304).
- 40 7. Sistema láser de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por el hecho de que el medio de ganancia del  
láser semilla (104) es Nd: YAG.
8. Sistema láser de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por el hecho de que comprende, además, un  
atenuador (228) configurado para ajustar pasivamente la energía de bombeo al láser semilla (104).
9. Procedimiento para generar pulsos de láser que comprende las etapas de:  
45 generar luz láser pulsada utilizando un láser semilla (104);  
dirigir la luz láser pulsada a un amplificador (108);  
amplificar la luz láser pulsada con el amplificador; y  
operar un láser de bombeo (112) para proporcionar energía de bombeo tanto al láser semilla como al  
amplificador;
- 50 en el que generar la luz láser pulsada utilizando el láser semilla comprende operar un absorbedor saturable para  
generar un pulso conmutado por Q y para prevenir un modo de funcionamiento de auto-emisión láser,  
comprendiendo el procedimiento, además, la etapa de operar un resonador del láser semilla como resonador  
inestable para evitar la aparición de puntos calientes en la luz láser pulsada.
- 55 10. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 9, caracterizado por el hecho de que comprende, además,  
prevenir la aparición de puntos calientes en el haz de salida del láser semilla por medio de dos espejos (316, 332)  
del láser semilla (104) que forman el resonador inestable.
- 60 11. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 9, que comprende, además, la etapa de selección de una  
longitud y el doblado de una fibra óptica multimodo (208; 232, 234) dispuesta para conducir la energía de bombeo al  
láser semilla (104) y al amplificador (108), de manera que la longitud y el doblado es suficiente para codificar una  
radiación láser para proporcionar una distribución de energía de bombeo homogénea a la salida de la fibra óptica

multimodo, con el fin de hacer que la energía de bombeo al láser semilla y al amplificador sea insensible a fluctuaciones de calidad del haz de láser de bombeo.

5 12. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 9, caracterizado por el hecho de que comprende, además, la etapa de hacer que el láser de bombeo (112) emita pulsos de energía constante, y la etapa de ajustar la energía de bombeo conducida a por lo menos el amplificador (108) por medio de un atenuador variable (228).

10 13. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 9, caracterizado por el hecho de que comprende, además, la etapa de ajustar la energía de bombeo suministrada al láser semilla (104) por medio de un atenuador (228).

14. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 9, caracterizado por el hecho de que comprende, además, la etapa de duplicar la frecuencia de un haz de láser de tratamiento para utilizarse en un material objetivo.

15 15. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 9, caracterizado por el hecho de que comprende, además, emplear un único láser de bombeo (112) para soportar una sincronización automática del funcionamiento del láser semilla (104) y el amplificador (108).

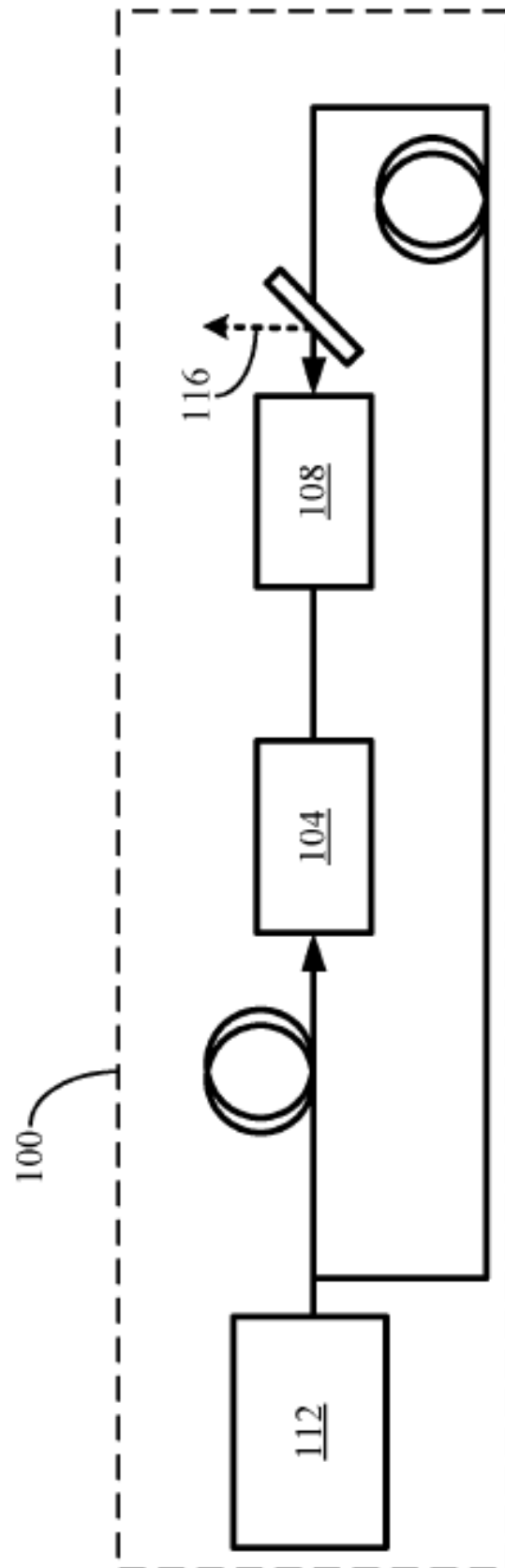


FIG. 1

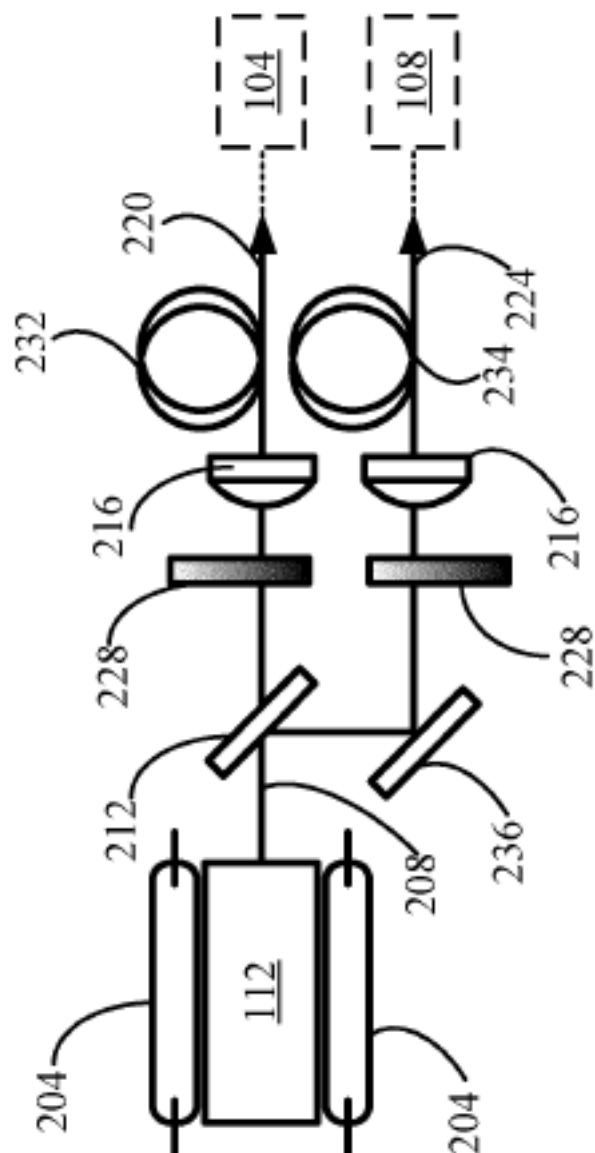


FIG. 2

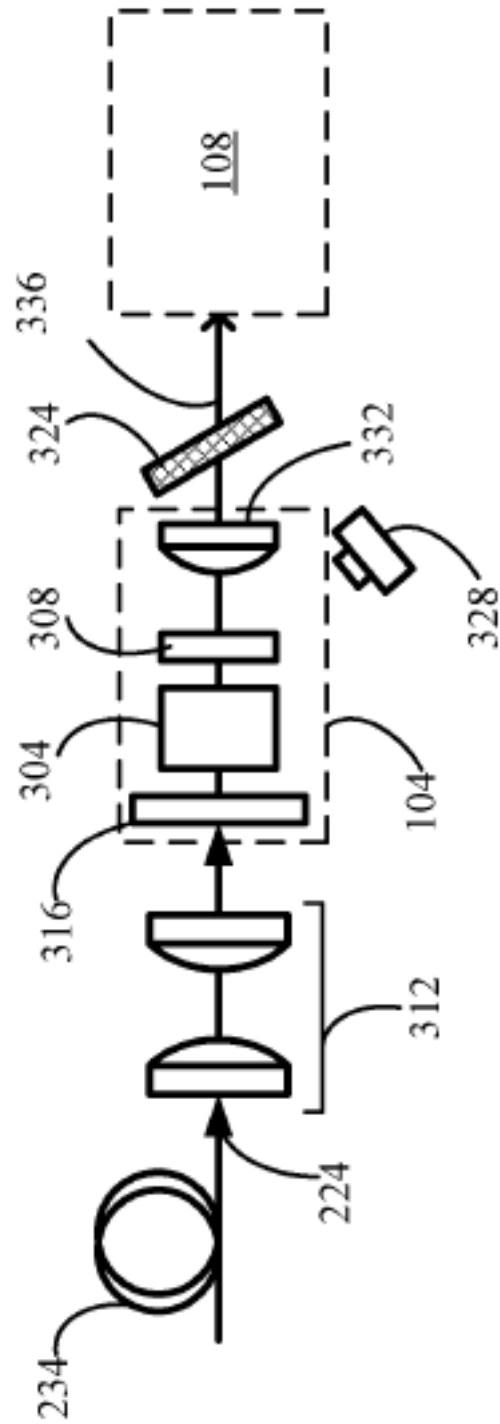


FIG. 3

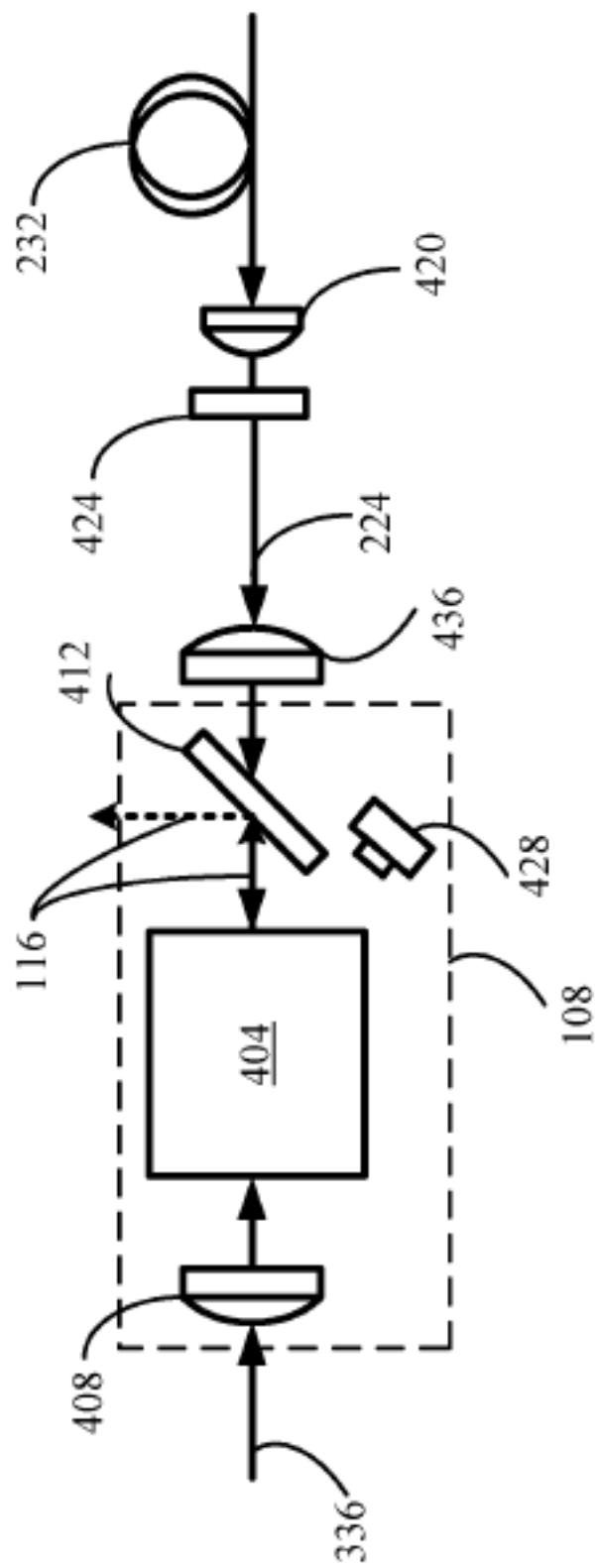


FIG. 4

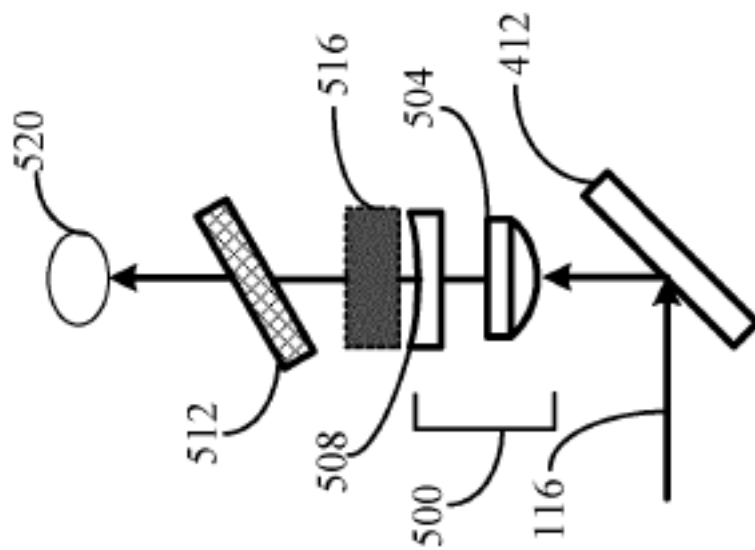


FIG. 5



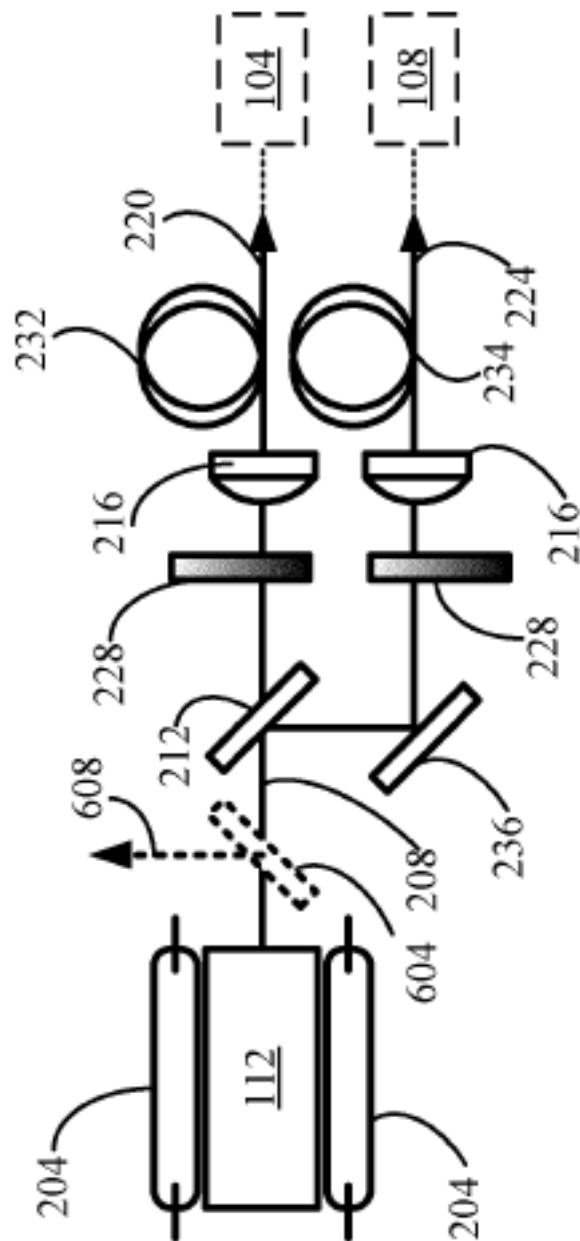


FIG. 6

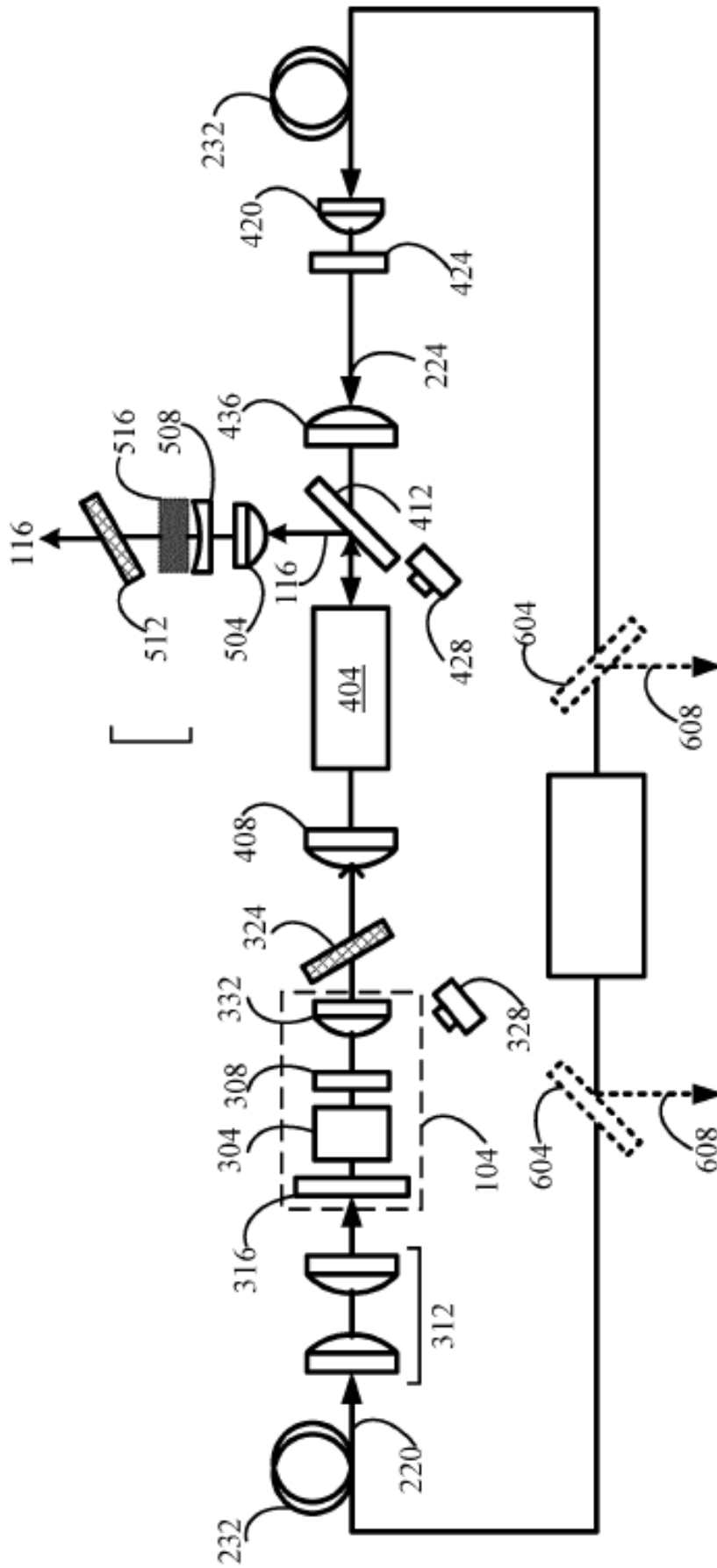


FIG. 7

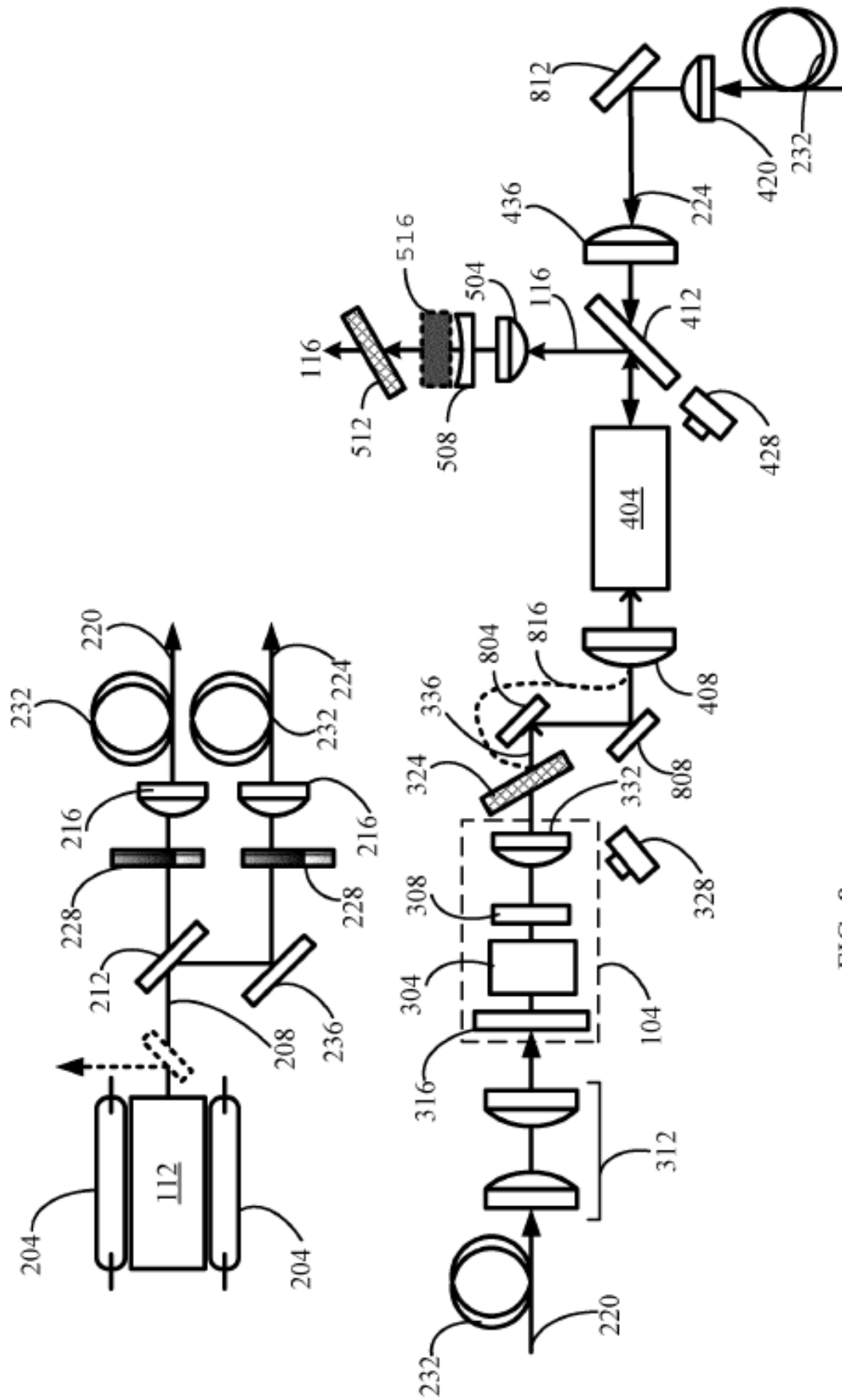


FIG. 8

## REFERENCIAS CITADAS EN LA DESCRIPCIÓN

*Esta lista de referencias citadas por el solicitante es únicamente para la comodidad del lector. No forma parte del documento de la patente europea. A pesar del cuidado tenido en la recopilación de las referencias, no se pueden excluir errores u omisiones y la EPO niega toda responsabilidad en este sentido.*

### Documentos de patentes citados en la descripción

- DE 102010045184 A1, EADS [0007]
- US 2012312267 A1, Ridderbusch [0007]
- US 2009227995 A1, Bhawalkar [0007]
- US 2005265678 A1, Manyam [0007]
- US 6295161 B1, Bazzocchi [0007]
- US 4575849 A, CHUN [0007]

### Literatura no de patentes citada en la descripción

- PEUSER. Compact, passively Q-switched, all-solid-state master oscillator-power amplifier-optical parametric oscillator (MOPA-OPO) system pumped by a fiber-coupled diode laser generating high-brightness, tunable, ultraviolet radiation. APPLIED OPTICS, 01 July 2009, vol. 48 (19), 3839-3845 [0007]
- BERNSTEIN. Treatment of tattoos with a 755-nm Q-switched alexandrite laser and novel 1064 nm and 532 nm Nd:YAG laser handpieces pumped by the alexandrite treatment beam. Journal of Drugs in Dermatology, 01 November 2010, vol. 9 (11) [0007]
- P.G. GOBBI y otros. Novel unstable resonator configuration with a self-filtering aperture: experimental characterization of the Nd:YAG loaded cavity. APPLIED OPTICS, 01 January 1985, vol. 24 (1), 26-33 [0007]
- Pulse-periodic Nd:YAlO<sub>3</sub> laser with a phase-locked aperture under conditions of phase conjugation by stimulated Brillouin scattering. A.F. VASIL'EV et al. Soviet Journal of Quantum Electronics. American Institute of Physics, 01 May 1991, vol. 21, 494-497 [0007]