

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 776 027**

51 Int. Cl.:

H01S 3/30	(2006.01)
G02F 1/35	(2006.01)
G02F 1/355	(2006.01)
G02F 1/365	(2006.01)
H01S 3/109	(2006.01)
H01S 3/081	(2006.01)
H01S 3/083	(2006.01)
H01S 3/094	(2006.01)
H01S 3/042	(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **19.04.2013 PCT/AU2013/000406**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **24.10.2013 WO13155568**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **19.04.2013 E 13778794 (1)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.01.2020 EP 2839553**

54 Título: **Dispositivo y procedimiento para convertir luz y sistema láser**

30 Prioridad:

20.04.2012 US 201261635977 P

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

28.07.2020

73 Titular/es:

**MACQUARIE UNIVERSITY (100.0%)
Balaclava Road
North Ryde, NSW 2109 , AU**

72 Inventor/es:

**MILDREN, RICHARD, PAUL y
KITZLER, ONDREJ**

74 Agente/Representante:

CONTRERAS PÉREZ, Yahel

ES 2 776 027 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

Dispositivo y procedimiento para convertir luz y sistema láser

5 CAMPO TÉCNICO

La descripción que se da aquí se refiere, en general, a dispositivos para convertir luz recibida por los mismos, sistemas láser relacionados, y procedimientos relacionados para convertir luz y, en particular, pero no exclusivamente, a dispositivos, sistemas y procedimientos para convertir luz recibida en luz infrarroja de alta potencia utilizando estimulación Raman dispersándose.

ANTECEDENTES

15 La generación de luz de onda continua de alta potencia a longitudes de onda diferentes de los iones de tierras raras (ejemplos de los cuales incluyen, entre otros, líneas láser Nd, Yb, Er, Ho, Tm) y sus armónicos siguen siendo un desafío para los láseres de estado sólido actuales. Este desafío ha sido abordado por algunos utilizando la conversión de frecuencia no lineal en osciladores paramétricos ópticos (OPO). Sin embargo, las perspectivas de aumentar en gran medida la potencia de salida de los OPOs pueden ser limitadas ya que la carga térmica de los cristales no lineales puede provocar un desfase y daños. Los láseres de fibra de onda continua (cw) Raman ofrecen elevadas potencias de salida de 150 W o más en longitudes de onda diferentes de las líneas láser de los láseres dopados de tierras raras y sus armónicos. La tecnología láser de fibra Raman no puede utilizarse para variar armónicos de láseres dopados de tierras raras dado que los componentes de fibra, por ejemplo, espejos de rejilla de fibra integrados, pueden ser muy difíciles de lograr para láseres de alta potencia y debido a los efectos acumulativos de daños en la fibra, tales como foto-oscurcimiento. Sin embargo, una conversión armónica posterior y/o una salida de ancho de línea estrecha pueden resultar problemáticas, especialmente en presencia de una fuerte dispersión de Brillouin estimulada.

Se han demostrado sistemas láser que presentan, en el interior de una estructura resonante, un medio de ganancia cristalina dopada y un medio Raman para convertir una frecuencia nativa del medio de ganancia cristalina dopada. El aumento de la potencia de estos sistemas láser, por ejemplo, durante la operación de onda continua o cuasi-continua en longitudes de onda infrarrojas, ha resultado problemático.

35 MILDEN R P ET AL: "SOLID-STATE RAMAN LASER GENERATING DISCRETELY TUNABLE ULTRAVIOLET BETWEEN 266 - AND 320 NM", OPTICS LETTERS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, US, vol. 32, nº 7, 1 de abril de 2007 (2007-04-01), páginas 814-816 y WO 2006/058381 A1, y US 5 673 281 A cada uno describe un resonador láser Raman de cavidades externas, que incluye un medio activo Raman sólido que tiene una conductividad térmica de más de 2 W/K/m y un medio no lineal adicional dispuesto en el resonador, siendo el medio no lineal adicional uno de un segundo armónico generador, un generador de frecuencia de suma o un generador de frecuencia de diferencia.

DESCRIPCIÓN

40 La invención se define en las reivindicaciones independientes 1, 13, 15 y 21. En las reivindicaciones dependientes se exponen realizaciones de la invención.

45 Se describe aquí un dispositivo para convertir luz recibida por el mismo. El dispositivo comprende una estructura resonante que comprende un medio Raman. La estructura resonante está dispuesta para resonar luz Raman generada por una interacción Raman entre el medio Raman y la luz cuando se recibe.

50 Se describe aquí un dispositivo para convertir luz recibida por el mismo. El dispositivo comprende una estructura resonante que comprende un medio Raman que tiene una conductividad térmica de más de 2 W/K/m. La estructura resonante está dispuesta para resonar luz Raman generada por una interacción Raman entre el medio Raman y la luz cuando se recibe. La estructura resonante está dispuesta para perder menos de un 5% de la energía de la luz Raman resonante en un período de ciclo de resonancia de la estructura resonante.

55 El dispositivo de acuerdo con la presente invención comprende un acoplador de entrada. El acoplador de entrada es para la entrada de luz cuando se recibe en la estructura resonante.

Una realización del dispositivo puede ser capaz de generar más luz Raman que los dispositivos de la técnica anterior. La conductividad térmica superior a 2 W/K/m puede disipar el calor generado dentro del medio Raman durante la generación de luz Raman, especialmente, aunque no necesariamente, de una potencia relativamente mayor.

60 En una realización, la luz Raman es luz infrarroja. La estructura resonante puede estar dispuesta para resonar la luz infrarroja Raman. La ganancia de la interacción Raman generalmente disminuye al aumentar la longitud de onda de la luz Raman. Por ejemplo, para una zona de punto focal dada en el medio Raman, puede necesitarse más luz para

5 la generación de luz Raman infrarroja que la generación de luz Raman visible. En consecuencia, el calor generado durante la generación de luz Raman infrarroja puede ser mayor que el calor generado durante la generación de luz Raman de longitud de onda más corta. En consecuencia, la generación de luz infrarroja Raman puede estar asociada a desafíos de ingeniería incluyendo la generación de lentes térmicas relativamente potentes, birrefringencia inducida y pérdida de luz Raman, y una mayor probabilidad de fractura del medio Raman inducida térmicamente.

El medio Raman puede ser tungstato de bario. El tungstato de bario puede tener una conductividad térmica de 2,3 W/K/m. La conductividad térmica citada aquí puede ser para una temperatura del medio Raman de 320 K.

10 Una mayor conductividad térmica del medio Raman puede dar como resultado una mayor disipación de calor, facilitando la generación de una mayor potencia de luz Raman, o la generación de luz Raman en longitudes de onda previamente inalcanzables. La conductividad térmica puede ser superior a 5 W/m/K. El medio Raman puede ser un material de vanadato tal como vanadato de itrio o vanadato de gadolinio. El vanadato puede tener una conductividad térmica de 5,2 W/K/m. La conductividad térmica puede ser superior a 100 W/m/K. El medio Raman puede ser silicio.
 15 El silicio puede tener una conductividad térmica de 153 W/m/K. La conductividad térmica puede ser superior a 1800 W/m/K. El medio Raman puede ser diamante. El diamante puede tener una conductividad térmica entre 1000 W/m/K y 3000 W/m/K o más, dependiendo de la calidad del diamante.

20 Algunas aplicaciones de luz Raman se beneficiarían de la luz Raman de onda continua (es decir, la luz y, por lo tanto, la luz Raman es continua durante más de 1 s) o la luz Raman de onda casi continua (es decir, la luz y, por lo tanto, la luz Raman es continuo por más de 1 μ s). En estos casos, la potencia máxima de la luz puede estar limitada por la disponibilidad de fuentes de luz de potencia adecuada y la capacidad de carga térmica del medio Raman lo cual, a su vez, limita la ganancia de la interacción Raman. Tener una estructura resonante dispuesta para perder menos de un 5% de la energía de la luz Raman resonante en un período de ciclo de resonancia (es decir, el tiempo requerido para
 25 que la luz Raman realice un recorrido de ida y vuelta) de la estructura resonante puede permitir la generación de luz Raman de onda continua o de onda casi continua. La reducción de la pérdida puede admitir niveles de ganancia más bajos en longitudes de onda de luz Raman más largas, por ejemplo. La estructura resonante puede estar dispuesta para perder menos de un 2% de la energía de la luz Raman resonante en un período de ciclo de resonancia. La estructura de resonancia puede estar dispuesta para perder menos de un 1,5% de la energía de la luz Raman de resonancia en un período de ciclo de resonancia. La estructura de resonancia puede estar dispuesta para perder
 30 menos de un 1% de la energía de la luz Raman de resonancia en un período de ciclo de resonancia. La estructura resonante puede estar dispuesta para perder menos de un 0,2% de la energía de la luz Raman resonante en un período de ciclo de resonancia.

35 En una realización, el medio Raman tiene por lo menos una pérdida de absorción y dispersión que reduce la potencia de la luz Raman resonante en menos de un 2% al pasar a través del mismo. La reducción de la pérdida del medio Raman puede dar como resultado la generación de más luz Raman o longitudes de onda de luz más largas, especialmente luz Raman de onda continua o cuasi continua. El medio Raman puede tener por lo menos una pérdida de absorción y dispersión que reduce la potencia de la luz Raman resonante en menos de un 1% al pasar a través. El
 40 medio Raman puede tener por lo menos una pérdida de absorción y dispersión que reduce la potencia de la luz Raman resonante en menos de un 0,5% al pasar a través del mismo. El medio Raman puede tener por lo menos una pérdida de absorción y dispersión que reduce la potencia de la luz Raman resonante en menos de un 0,1% al pasar a través.

45 En una realización, la estructura resonante tiene un puerto óptico de luz Raman configurado para la salida de menos de un 2% de la energía de la luz Raman resonante en el período del ciclo de resonancia. La estructura resonante puede tener un puerto óptico de luz Raman configurado para la salida de menos de un 1% de la energía de la luz Raman resonante en el período del ciclo de resonancia. La estructura resonante puede tener un puerto óptico de luz Raman configurado para la salida de menos de un 0,5% de la energía de la luz Raman resonante en el período del ciclo de resonancia. La estructura resonante puede tener un puerto óptico de luz Raman configurado para la salida de
 50 menos de un 0,1% de la energía de la luz Raman resonante en el período del ciclo de resonancia.

Una realización del dispositivo comprende una pluralidad de superficies reflectantes separadas. La estructura resonante puede comprender las superficies reflectantes separadas. Cada una de la pluralidad de superficies reflectantes puede estar en un extremo respectivo de la estructura resonante. Por lo menos parte de la pluralidad de superficies reflectantes puede ser cóncava. La estructura resonante puede comprender un resonador hemisférico. Toda la pluralidad de superficies reflectantes puede ser cóncava. La estructura resonante puede comprender un resonador concéntrico o casi concéntrico. La estructura resonante puede comprender generalmente cualquier estructura resonante adecuada, por ejemplo, un cristal fotónico o una estructura de rejilla de Bragg. Alternativamente, la estructura resonante puede comprender un resonador de anillo.
 55

60 En una realización, la interacción Raman genera una carga térmica promedio en el medio Raman mayor que por lo menos uno de 0,1W, 1W, 3W, 10W y 100W.

En una realización, el medio Raman tiene un coeficiente de expansión térmica de menos de por lo menos uno de $10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

5 En una realización, el medio Raman es cristalino y comprende por lo menos un elemento del Grupo IV de la tabla periódica. El medio Raman puede comprender carbono. El medio Raman puede comprender silicio. El silicio puede ser silicio cristalino. El medio Raman puede comprender diamante. El dispositivo puede estar dispuesto para que la luz Raman se genere para propagarse a lo largo de un eje $\langle 110 \rangle$ del diamante. El dispositivo puede estar dispuesto para que un vector de polarización de la luz Raman se alinee con un eje $\langle 111 \rangle$ del diamante. El dispositivo puede estar dispuesto para que cuando se genere la luz Raman se propague a lo largo de cualquier dirección en el diamante perpendicular a una dirección $\langle 111 \rangle$, y que el vector de polarización de la luz Raman se alinee con un eje $\langle 111 \rangle$ del diamante. Alternativa o adicionalmente, el medio Raman comprende por lo menos uno de un cristal de tungstato, un cristal de molibdeno y un cristal de vanadato.

15 En una realización, la luz tiene una longitud de onda mayor de 900 nm. El medio Raman puede tener un coeficiente de ganancia Raman mayor de 3 cm/GW. El medio Raman puede tener un coeficiente de ganancia Raman mayor de 8 cm/GW.

20 En una realización, la luz tiene una potencia media superior a 10W. La luz puede tener una potencia promedio mayor que por lo menos uno de 30W, 50W, 100W y 1000W.

25 En una realización, la luz tiene una potencia máxima por unidad de área de menos de 160 MW/cm² en el medio Raman. En general, se considera que éste es el umbral de daño del diamante para luz incidente de cw que tiene una longitud de onda de 10,6 µm. El umbral de daño depende del volumen del diamante y la calidad de la superficie. El umbral de daño puede escalar con $t_p^{0,25} \cdot w_0^{0,5}$ dónde t_p es la duración del pulso y w_0 el radio del punto de luz que incide en la superficie.

30 De acuerdo con la invención, la estructura resonante tiene un medio no lineal dispuesto para interactuar con la luz y la luz Raman o la luz Raman para generar otra luz. El medio no lineal comprende un medio no lineal de segundo orden. El medio no lineal de segundo orden puede comprender un cristal de, por ejemplo, borato de bario beta, borato de cesio y litio, borato de bismuto, triborato de litio, yodato de litio, niobato de litio, seleniuro de galio y titanil fosfato de potasio o, en general, cualquier material adecuado. El medio no lineal de segundo orden puede interrogarse periódicamente. La estructura resonante puede tener otro puerto óptico de luz dispuesto para pasar por lo menos un 50% de la otra luz. El medio no lineal puede ser otro medio Raman o cualquier medio no lineal adecuado. El medio no lineal puede configurarse para la salida de coincidencia de fase en el segundo armónico de una luz Raman, o la frecuencia de suma o de diferencia de una luz Raman con la luz recibida. El medio no lineal puede incluir un sintonizador para permitir al usuario seleccionar entre por lo menos una de las frecuencias de segundo armónico, suma o diferencia. El sintonizador puede controlar la temperatura o el ángulo del medio no lineal.

40 En una realización, la luz es una luz verde y la otra luz es una luz ultravioleta.

En una realización, el dispositivo comprende un elemento de refrigeración de material Raman acoplado térmicamente al material Raman.

45 En una realización, la estructura resonante comprende un revestimiento reflectante en por lo menos una superficie del material Raman. La estructura resonante puede comprender una pluralidad de recubrimientos reflectantes en una pluralidad de superficies del material Raman.

50 En una realización, la longitud de la trayectoria de la luz Raman a través del medio Raman es de entre 2 mm y 20 mm. La longitud de la trayectoria de la luz Raman a través del medio Raman puede ser de entre 7 mm y 10 mm.

En una realización, el diámetro de la luz es de entre 0,5 y 0,7 veces menor que el diámetro de la luz Raman dentro del medio Raman.

55 Una realización comprende un medio de traslado del medio Raman que puede accionarse para trasladar el medio Raman para controlar el efecto de birrefringencia sobre el medio Raman en la luz Raman.

Se describe aquí un sistema láser que comprende un dispositivo de acuerdo con la descripción anterior y una fuente de luz. El dispositivo y la fuente de luz están dispuestos de manera cooperativa para que el dispositivo reciba luz.

60 En una realización, la fuente de luz comprende por lo menos uno de un láser de gas, un láser que tiene iones de neodimio, un láser que tiene iones de iterbio, un láser que tiene iones de holmio, un láser que tiene iones de tulio, un láser que tiene iones de erbio, un sintonizador láser, un láser de fibra, un láser que tiene un medio láser de estado sólido, un láser que tiene un medio cristalino en masa, un láser de ancho de línea estrecho, un láser de diodo, un láser

semiconductor bombeado ópticamente, un láser de vapor alcalino bombeado por diodos, un láser químico y un láser de diodos cónico. La fuente de luz puede incluir un material no lineal para convertir su luz en un armónico tal como un segundo, tercer o cuarto armónico. Puede utilizarse cualquier fuente de luz adecuada.

5 En una realización, la fuente de la luz comprende iones de neodimio. La fuente de la luz puede estar dispuesta para generar la luz en forma de haz. La fuente de la luz puede estar dispuesta para generar luz que tenga una longitud de onda de 1064 nm. La fuente de la luz puede estar dispuesta para generar luz en un estado linealmente polarizado. La fuente de la luz puede estar dispuesta para generar luz que tenga un valor M^2 de menos de 2. La fuente de luz puede estar dispuesta para generar luz que tenga una potencia media mayor de por lo menos uno de 1, 5, 10, 30, 50, 100 y 1000 W.

15 En una realización, la fuente de luz comprende un telescopio configurado para expandir el haz. La fuente de luz puede comprender un atenuador de luz. La fuente de luz puede comprender un aislador óptico. La fuente de luz puede comprender un rotador de polarización lineal. La fuente de luz puede comprender una lente de enfoque.

En una realización, la fuente de luz está dispuesta para proporcionar luz continua durante por lo menos 1 μ s. La fuente de luz puede estar dispuesta para proporcionar luz continua durante por lo menos 1 s.

20 En una realización, la fuente de luz está dispuesta para proporcionar luz con un ancho de línea de ancho total a mitad del máximo de menos por lo menos uno de 2,0 cm^{-1} , 1,5 cm^{-1} , 1,0 cm^{-1} y 0,5 cm^{-1} . Alternativamente, la fuente de luz puede estar dispuesta para proporcionar luz que tenga un ancho de línea de ancho total a mitad del máximo de menos de 10 cm^{-1} .

25 Se describe aquí un procedimiento para convertir luz. El procedimiento comprende la etapa de interactuar la luz con un medio Raman para generar luz Raman. El procedimiento comprende la etapa de resonar la luz Raman generada.

30 Se describe aquí un procedimiento para convertir luz. El procedimiento comprende la etapa de interactuar la luz con un medio Raman para generar luz Raman. El medio Raman tiene una conductividad térmica de más de 2 W/K/m. El procedimiento comprende la etapa de resonar la luz Raman generada. Menos de un 5% de la energía de la luz Raman resonante se pierde en un período de ciclo de resonancia de la luz Raman resonante.

El procedimiento de acuerdo con la presente invención comprende la etapa de la entrada de luz en una estructura resonante que tiene el medio Raman. La luz Raman generada resuena en la estructura resonante.

35 De acuerdo con la invención, menos de un 5% de la energía de la luz Raman resonante se pierde en un ciclo de resonancia. Menos de un 2% de la energía de la luz Raman resonante puede perderse en un ciclo de resonancia. Menos de un 1,5% de la energía de la luz Raman resonante puede perderse en un ciclo de resonancia. Menos de un 1% de la energía de la luz Raman resonante puede perderse en un ciclo de resonancia. Menos de un 0,2% de la energía de la luz Raman resonante puede perderse en un ciclo de resonancia.

40 En una realización, el procedimiento comprende la etapa de pasar la luz Raman a través del medio Raman que puede causar por lo menos una pérdida de dispersión y absorción que puede eliminar menos de un 2% de la potencia de la luz Raman. La etapa de pasar la luz Raman a través del medio Raman puede causar por lo menos una pérdida de dispersión y absorción que puede eliminar menos de un 1% de la potencia de la luz Raman. La etapa de pasar la luz Raman a través del medio Raman puede causar por lo menos una pérdida de dispersión y absorción que puede eliminar menos de un 0,5% de la potencia de la luz Raman. La etapa de pasar la luz Raman a través del medio Raman puede causar por lo menos una pérdida de dispersión y absorción que puede eliminar menos de un 0,1% de la potencia de la luz Raman.

50 Una realización del procedimiento comprende la etapa de generar una carga térmica promedio en el medio Raman mayor que por lo menos uno de 0,1W, 1W, 3W, 10W y 100 W.

55 En una realización, el medio Raman es cristalino y comprende por lo menos un elemento del Grupo IV de la tabla periódica. El medio Raman puede comprender carbono. El medio Raman puede comprender diamante. El medio Raman puede comprender silicio.

En una realización, la luz tiene una longitud de onda mayor de 900 nm. El medio Raman puede tener un coeficiente de ganancia Raman mayor de 3 cm/GW . El medio Raman puede tener un coeficiente de ganancia Raman mayor de 10 cm/GW para la luz.

60 En una realización, la luz tiene una potencia media mayor de 5W. La luz puede tener una potencia media mayor de 10W. La luz puede tener una potencia media mayor de 20W. La luz puede tener una potencia media mayor de 50W. La luz puede tener una potencia media mayor de 100W. La luz puede tener una potencia media mayor de 1000 W.

En una realización, la luz tiene una potencia máxima por unidad de superficie de menos de 160 MW/cm² en el medio Raman.

5 En una realización, la luz es continua durante por lo menos 1 μ s. La luz puede ser continua durante por lo menos 1 s.

El procedimiento de acuerdo con la presente invención comprende la etapa de interactuar la luz Raman resonante y la luz o la luz Raman con medio no lineal de segundo orden para generar otra luz.

10 Una realización comprende la etapa de eliminar el calor del medio Raman utilizando un elemento de refrigeración de material Raman.

En una realización, la longitud de la trayectoria de la luz Raman a través del medio Raman es entre 2 mm y 20 mm. La longitud de la trayectoria de la luz Raman a través del medio Raman puede ser entre 7 mm y 10 mm.

15 En una realización, el diámetro de la luz es entre 0,5 y 0,7 veces menor que el diámetro de la luz Raman dentro del medio Raman.

20 Una realización comprende la etapa de trasladar el medio Raman para controlar el efecto de birrefringencia del medio Raman en la luz Raman.

En una realización, la estructura resonante es un resonador de anillo.

25 Donde sea posible, pueden combinarse las características de los dispositivos, sistemas láser y procedimientos descritos anteriormente.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

30 Se describirán ahora unas realizaciones a modo de ejemplo sólo con referencia a las figuras adjuntas en las cuales:

- La figura 1 es un diagrama esquemático de un dispositivo para convertir luz recibida por el mismo;
- La figura 2 es un diagrama esquemático de una realización de acuerdo con la invención de un dispositivo para convertir luz recibida por el mismo;
- La figura 3 muestra un diagrama esquemático de un sistema láser que comprende un dispositivo para convertir luz recibida por el mismo, y una fuente láser de ejemplo que genera la luz;
- La figura 4 muestra una potencia de salida de luz Raman en función de una potencia de luz de bombeo para el sistema láser de la figura 3; y
- La figura 5 muestra una gráfica de la dependencia de la ganancia Raman de la longitud de onda de la luz para varios medios Raman.
- La figura 6 muestra un mapa de birrefringencia para la luz que se propaga a través de un medio Raman de ejemplo.
- La figura 7 muestra la dependencia del radio de la cintura de una potencia térmica depositada.
- Las figuras 8 a 14 muestran gráficas de potencia de salida y eficiencia frente a la potencia de bombeo para una realización de un dispositivo para convertir luz recibida por el mismo.
- La figura 15 muestra una gráfica de un ejemplo de un coeficiente de acoplamiento de salida no lineal óptimo para un resonador con un medio Raman de diamante.
- La figura 16 muestra una comparación de un modelo de ejemplo con datos medidos.
- La figura 17 muestra una gráfica del acoplamiento de salida en función de la potencia de salida de Stokes para diferentes niveles de potencia de bombeo para un modelo de ejemplo.
- La figura 18 muestra una gráfica de umbral en función de los parámetros de bombeo y confocales de Stokes para un modelo de ejemplo.
- La figura 19 muestra una gráfica de umbral en función de la absorción y la longitud residual del diamante, y la longitud óptima del cristal, para un modelo de ejemplo.
- La figura 20 muestra una estructura resonante que comprende un resonador de anillo.
- La figura 21 muestra la estabilidad de la estructura resonante en función de la deposición de calor en el cristal Raman y el tamaño de cintura de bombeo para las condiciones del láser de la figura 4.
- Las figuras 22 y 23 muestran una gráfica bidimensional de la potencia de entrada requerida para generar luz Raman en los ejemplos de las figuras 1 y 3.

DESCRIPCIÓN DE REALIZACIONES

60 La figura 1 muestra un dispositivo para convertir luz 12 recibida por el mismo, el dispositivo se indica, en general, con el número 10. La luz 12 es generada por una fuente de luz 11 en forma de láser dopado de iones de tierras raras de onda continua, específicamente un láser que tiene un cristal de granate de itrio y aluminio dopado con neodimio,

aunque puede utilizarse cualquier fuente de luz adecuada. En otra realización, el láser tiene un cristal de vanadato dopado con neodimio. El dispositivo 10 y la fuente de luz 11 están dispuestos de manera cooperativa para que el dispositivo recibe la luz 12. Es decir, la salida del haz de la fuente de luz 11 está alineada con un eje óptico 13 en un puerto óptico de entrada 15 del dispositivo, aunque no necesariamente en todas las realizaciones.

El dispositivo 10 comprende una estructura resonante 14. La estructura resonante tiene un medio Raman 16. La estructura resonante 14 está dispuesta para resonar la luz Raman 18 generada por una interacción Raman entre el medio Raman 16 y la luz 12 cuando se recibe. La interacción Raman comprende dispersión Raman estimulada. La luz Raman puede comprender por lo menos uno de un primer Stokes, un segundo Stokes y un Stokes de un orden superior (por ejemplo, un tercer Stokes) que el segundo Stokes. El medio Raman, en todas las realizaciones, tiene una conductividad térmica de más de 2 W/K/m. Sin embargo, esta conductividad térmica puede ser de hasta 3000 W/m/K o más, dependiendo del medio Raman elegido 16. El medio Raman adecuado puede incluir cualquiera de vanadato, silicio, tungstato, molibdeno y diamante, por ejemplo. Generalmente, aunque no necesariamente, un medio Raman que tiene una conductividad térmica más alta puede mitigar los efectos adversos del calor generado en el mismo. Generalmente, un medio Raman que tiene una conductividad térmica más alta es adecuado para la generación de luz Raman de onda continua o casi continua, especialmente en longitudes de onda infrarroja y de infrarroja media, aunque no necesariamente limitado a esto. Generalmente, aunque no necesariamente, un medio Raman que tiene una conductividad térmica más alta es adecuado para una generación de luz Raman de mayor potencia media. Durante el uso, se genera calor en el medio Raman mediante el proceso de dispersión Raman estimulado inelástico y, en algunas realizaciones, también por absorción parasitaria (por ejemplo, debido a impurezas cristalinas, centros de color y defectos, etc.). Un elemento de refrigeración del medio Raman puede, aunque no necesariamente, estar acoplado térmicamente al medio Raman para eliminar el calor generado dentro del medio Raman. Por ejemplo, el medio Raman puede montarse en un disipador de calor. El disipador de calor puede ser un bloque de cobre. Puede intercalarse una lámina de indio o cualquier soldadura o pasta conductora térmica entre el medio Raman y el disipador de calor para proporcionar un buen contacto térmico. El disipador de calor puede tener canales de fluido a través del mismo y, a través de los canales, se mueve un fluido, por ejemplo, agua o aire, para eliminar el calor transferido al disipador de calor. Alternativa o adicionalmente, el disipador de calor puede tener unas aletas para enfriar el aire. El disipador de calor puede enfriarse con un ventilador. Generalmente puede utilizarse cualquier elemento de refrigeración de medio Raman adecuado.

La estructura de resonancia 14 está dispuesta para perder por lo menos un 5% de la energía de luz de resonancia Raman en un período de ciclo de resonancia de la estructura de resonancia 14. El período de ciclo de resonancia de la estructura de resonancia es el tiempo que tarda un fotón de la luz de resonancia Raman para realizar un recorrido de ida y vuelta dentro de la estructura de resonancia de la luz 14. Esta pérdida incluye, por ejemplo, la pérdida de cualquier espejo de la estructura de resonancia, y cualquier medio de la estructura de resonancia, incluyendo el medio Raman 16. Pueden utilizarse espejos y cristales de calidad suficiente. Una pérdida de menos de un 5% puede facilitar la generación de luz Raman de onda continua o casi continua, especialmente en las longitudes de onda infrarroja e infrarroja media donde la ganancia Raman es relativamente baja. Por ejemplo, el solicitante tiene la impresión de que puede ser difícil o imposible obtener un funcionamiento eficiente utilizando una estructura resonante que tenga una pérdida mayor de un 5% por ciclo de resonancia para la generación de luz Raman de onda continua o casi continua.

La figura 5 muestra una gráfica de la dependencia de la ganancia Raman de la longitud de onda de la ("del bombeo de") luz para varios medios Raman. En particular, la dependencia de la longitud de onda de los coeficientes de ganancia seleccionados para el diamante para la polarización de bombeo paralelo a una dirección del cristal $\langle 110 \rangle$ se indica mediante símbolos llenos, el nitrato de bario se indica mediante círculos huecos, el tungstato de bario se indica mediante triángulos huecos, el silicio se indica mediante cuadrados huecos y el tungstato de potasio y gadolinio están indicados por diamantes huecos. Los cuadrados llenos son valores obtenidos a partir de ajustes a la dispersión no lineal de CARS alrededor de la frecuencia Raman. Los triángulos llenos muestran los coeficientes determinados a partir de la dispersión espontánea y el uso $T_2 = 7$ ps excepto para el punto a 694 nm que se determinó utilizando $T_2 = 5,2$ ps ($2,04 \text{ cm}^{-1}$). Los círculos llenos muestran coeficientes obtenidos a partir de mediciones del umbral de SRS. La línea continua muestra una predicción teórica $g_s(\langle 110 \rangle)$. La línea discontinua es la g_s teórica para bombeo paralelo a una dirección del cristal $\langle 111 \rangle$ y es $1 \frac{1}{3}$ veces la línea continua. En algunas longitudes de onda de luz Raman, especialmente para longitudes de onda de luz superiores a 1500 nm, puede ser ventajoso que la pérdida sea inferior a un 2%, un 1% o un 0,2%, por ejemplo. Por el contrario, para longitudes de onda cortas puede ser ventajoso que la pérdida sea superior a un 2% o a un 1%, por ejemplo.

Las pérdidas por absorción y dispersión del medio Raman pueden reducir sustancialmente el rendimiento del dispositivo 10. El medio Raman 16 del dispositivo 10 tiene pérdidas de absorción y dispersión que reducen la potencia de la luz Raman resonante en menos de un 2% por pasada a través del medio Raman. Otras realizaciones pueden tener una pérdida media Raman de menos de un 1%, un 0,5% o incluso un 0,1%, lo que puede facilitar la generación de luz Raman de onda continua o casi continua, especialmente a longitudes de onda de infrarrojo y de infrarrojo medio en las cuales la ganancia Raman es relativamente baja. En el ejemplo de la figura 1, el medio Raman es un diamante monocristalino con bajo contenido de nitrógeno y ultra baja birrefringencia IIa CVD. Sin embargo, en algunas

realizaciones, el medio Raman puede comprender por lo menos uno de tungstato de bario, un vanadato tal como vanadato de itrio o vanadato de gadolinio, silicio o cualquier otro medio Raman adecuado.

5 El diamante tiene una alta conductividad térmica, generalmente mayor que 1000 W/m/k, y un bajo coeficiente de expansión térmica que lo hace adecuado para algunas realizaciones de generación de luz Raman infrarroja de alta potencia. La interacción Raman en el diamante 16 puede generar aproximadamente 100 W de calor o más. Esto puede producirse para realizaciones en las que la luz tiene una potencia media mayor de, por ejemplo, 500 W o 1000W.

10 Además de sus propiedades térmicas favorables, a longitudes de onda de luz de 1000 nm, el coeficiente de ganancia Raman puede ser mayor de 3 cm/GW u 8 cm/GW. El diamante puede estar orientado respecto a la estructura resonante de modo que la luz Raman, cuando se genera, se propague a lo largo de un eje $\langle 110 \rangle$ del diamante, y el vector de polarización de la luz Raman puede quedar alineado con un eje $\langle 111 \rangle$ del diamante.

15 Los solicitantes han descubierto que el uso de luz con un ancho de línea menor o aproximadamente igual al del espectro de ganancia Raman (aproximadamente $1,5 \text{ cm}^{-1}$) da como resultado una mayor ganancia. Por ejemplo, la fuente de luz 11 está dispuesta para proporcionar luz que tiene un ancho de línea de menos de 2 cm^{-1} , pero una fuente de luz con un ancho de línea inferior a por lo menos uno de 10 cm^{-1} , $2,0 \text{ cm}^{-1}$, $1,5 \text{ cm}^{-1}$, $1,0 \text{ cm}^{-1}$, $0,5 \text{ cm}^{-1}$ y $0,2 \text{ cm}^{-1}$ puede mejorar la eficiencia y puede tener otros beneficios. Puede utilizarse cualquier fuente comercial adecuada.

20 La estructura resonante 14 del dispositivo 10, aunque no necesariamente de todas las realizaciones, tiene forma de dos espejos separados 20 y 22. Cada uno de los espejos 20 y 22 comprende un espejo de sílice que tiene un revestimiento reflectante adecuado en forma de revestimiento dieléctrico, pero puede utilizarse cualquier revestimiento adecuado o elemento de espejo. El revestimiento dieléctrico del espejo 20 es altamente transmisivo de la luz 12 (en general, mayor de un 80% transmisivo, aunque no necesariamente) y altamente reflectante de la luz Raman resonante 18 (en general, mayor de un 99% reflectante, aunque no necesariamente). El revestimiento dieléctrico del espejo 22 refleja la luz 12 (para que la luz haga una doble pasada a través del medio Raman) y transmite parcialmente la luz Raman 18. El espejo 22 funciona como puerto óptico de luz Raman o acoplador de salida que deja que salga menos de un 2% de la energía de luz Raman resonante de la estructura resonante por ciclo de resonancia. En algunas realizaciones, especialmente las realizaciones de onda continua de baja ganancia en longitudes de onda infrarroja o de infrarrojo medio, puede ser ventajoso configurar la pérdida del puerto óptico para que sea inferior a un 1%, un 0,5% o un 0,1% para mejorar la interacción Raman. Por el contrario, para longitudes de onda cortas puede ser ventajoso que la pérdida sea superior a un 2% o a un 1%, por ejemplo.

35 La luz de resonancia Raman 18 de la figura 1 es un primer Stokes generado por la interacción Raman. En algunas realizaciones, el resonador puede configurarse para confinar el primer Stokes de modo que el primer Stokes interactúe con el medio Raman para generar un segundo Stokes. Por ejemplo, los espejos 20 y 22 pueden ser altamente reflectantes ($> 99,9\%$, por ejemplo) del primer Stokes. El espejo 22 puede transmitir parcialmente el segundo Stokes y el espejo 20 puede reflejar mucho el segundo Stokes. El espejo 22 puede ser parcialmente transmisivo del tercer Stokes y el espejo 20 puede ser altamente reflectante del primer y segundo Stokes, etc.

40 La pérdida de luz de resonancia Raman en un período de ciclo de resonancia puede ser de varias fuentes de pérdida. La distribución de las pérdidas entre las fuentes generalmente no es tan importante como la pérdida neta, y que la pérdida neta de varias fuentes de pérdida sea inferior a un 5%. En el dispositivo 10, por ejemplo, aunque no necesariamente en todas las realizaciones, las pérdidas son predominantemente del acoplador de entrada 20 para la luz 12, pérdidas de superficie del medio Raman, pérdidas de volumen del medio Raman y el acoplador de salida 22. Específicamente, las pérdidas son un 0,01 % del acoplador de entrada 20, un 0,2% por pasada a través de una superficie del medio Raman, un 0,17%/cm (para la longitud de interacción de 0,95 cm en el medio Raman) y un 0,4% para el acoplador de salida 22. En consecuencia, para el dispositivo 10 de la figura 1, la pérdida de luz de resonancia Raman en un período del ciclo de resonancia es $0,01 + 0,2 \cdot 4 + 0,17 \cdot 0,95 \cdot 2 + 0,4 = 1,53\%$. Sin embargo, cualquiera de los componentes puede configurarse con un valor de pérdida diferente, de modo que la pérdida de luz Raman en un período de ciclo de resonancia sea inferior a un 5%. Las pérdidas más bajas, en particular las pérdidas de medio Raman en masa más bajas (por ejemplo, pérdidas en masa del diamante en las realizaciones que tienen un medio Raman de diamante), pueden mejorar el rendimiento del dispositivo 10. Los componentes de las figuras 2 y 3 pueden configurarse para tener valores de pérdida similares, o valores alternativos de pérdida de acuerdo con corresponda.

55 En algunas realizaciones, las fuentes de pérdidas distintas de las mencionadas anteriormente, por ejemplo, la generación de Stokes de orden superior o la conversión de frecuencia no lineal del primero Stokes, son fuentes de pérdida para luz Raman resonante que puede ser necesario tener en cuenta.

60 La figura 2 es un diagrama esquemático de una realización de un dispositivo 30 de acuerdo con la invención para convertir luz 12 por el mismo. La estructura resonante del dispositivo 30 comprende unos espejos extremos 34 y 36 y unos espejos 38 y 40 dispuestos ópticamente entre los espejos extremos para definir una geometría Z. El espejo 34 es altamente reflectante de la luz Raman (el "Stokes") y altamente transmisivo de la luz ("luz de bombeo"). El espejo 38 refleja mucho la luz y Stokes. El espejo 40 es altamente reflectante de la luz, la luz Raman, y altamente transmisivo,

tal como por lo menos un 50%, de otra luz 46 generada por otra interacción no lineal en la estructura resonante. El espejo 36 es altamente reflectante de la luz, la luz Raman y la otra luz. Un medio Raman 42, por ejemplo, un cristal de diamante, está dispuesto en un brazo del resonador Z y dispuesto en el otro brazo del resonador Z se encuentra un medio 44 no lineal de segundo orden dispuesto para interactuar con por lo menos uno de la luz y el Raman luz para generar la otra luz. El medio no lineal de segundo orden puede cortarse o sintonizarse y configurarse respecto al resonador para duplicar la frecuencia de la luz Raman. Por ejemplo, la luz puede tener una longitud de onda de 1064 nm (la de una fuente de luz láser Nd:YAG, por ejemplo), la luz Raman puede tener una longitud de onda de 1240 nm y la otra luz puede ser de 620 nm. Alternativamente, el cristal no lineal de segundo orden puede configurarse o ajustarse de modo que la otra frecuencia de luz sea la suma o diferencia de las frecuencias de luz y luz Raman. Se apreciará que la solución anterior es aplicable a una amplia variedad de frecuencias, desde la ultravioleta a la infrarroja, y a una amplia gama de tipos de interacciones no lineales, por ejemplo, la mezcla de cuatro ondas.

La figura 3 muestra un diagrama esquemático de un sistema láser 50 que comprende otro dispositivo 52 para convertir luz recibida por el mismo, y una fuente láser 54 que genera la luz. El dispositivo 52 tiene forma de láser Raman de diamante de cw resonador externo que funciona a 1240 nm. La fuente de luz 54 tiene forma de láser Nd:YVO₄ de 1064 nm. El medio Raman es un material de diamante de baja pérdida 56 acoplado térmicamente a un elemento de refrigeración de material Raman, montado específicamente en un disipador térmico de cobre 57. El disipador térmico puede enfriarse con un fluido. El umbral de generación de luz Raman fue de 11,3 W de luz incidente. Se logró una eficiencia de pendiente de aproximadamente un 50%. Hasta donde conoce el solicitante, 10,1 W representa la potencia láser Raman cristalina de cw más alta lograda.

El cristal de diamante era un diamante monocristalino CVD tipo IIa de ultra baja birrefringencia y de bajo contenido en nitrógeno (Element6 Ltd.) de dimensiones 5 × 9,5 × 1,2 mm³. Se aplicó un recubrimiento antirreflectante, en forma de pila dieléctrica, a las caras extremas (R = 1% a 1064 nm, R = 0,2% a 1240 nm). El rayo de bombeo polarizado linealmente fue incidente en la cara de diamante de 5 × 1,2 mm y se propagó a lo largo del eje <110>.

La fuente de luz 50 (el "bombeo") comprende un láser Nd:YVO₄ 58 de onda continua que genera una salida polarizada linealmente a 1064 nm con una M² de aproximadamente 1,7 a la máxima potencia de salida. Se utilizó un telescopio 60 con un aumento de 5 para expansión del haz y colimación. Una placa de media onda 62 y un polarizador 64 sirvieron de atenuador de potencia de bombeo. Después de pasar a través de un aislador óptico 66, se utilizó una placa de media onda 68 para alinear el vector de polarización de bombeo con el eje <111> del diamante para acceder a una ganancia más elevada. Para alcanzar el umbral de la dispersión estimulada Raman, se utilizó una lente de enfoque 70 de longitud focal f = 50 mm para enfocar el bombeo en el diamante. El diámetro del punto focal (a 1/e²) en el interior del diamante fue de 60 μm, lo que resultó en una intensidad incidente de aproximadamente 0,8 MW/cm² en el umbral de la generación de luz Raman. El bombeo, el bombeo residual, y las potencias de Stokes se midieron mediante fotodiodos PIN calibrados 72 y un medidor de potencia 74.

La estructura resonante del dispositivo 52 comprende un resonador casi concéntrico de 105 mm de largo formado por dos superficies reflectantes en forma de espejos cóncavos 76, 78 con un radio de curvatura de 50 mm. En funcionamiento, los espejos cóncavos 76, 78 ayudaron a regular el modo del oscilador Raman y los tamaños de cintura de bombeo. El acoplador de entrada 78 era altamente transmisivo (T = 96%) en la longitud de onda de bombeo y altamente reflectante (R = 99,99%) en la primera longitud de onda de Stokes de 1240 nm. El acoplador de salida 76 era altamente reflectante a 1064 nm para proporcionar un bombeo de doble paso, y presentaba una transmisión de un 0,4% en la primera longitud de onda de Stokes. Algunas realizaciones, sin embargo, sólo emplean especificaciones de bombeo de paso único y diseño del espejo relajante. Para evitar la generación del segundo componente de Stokes, se redujo al mínimo las reflectividades de los espejos a 1485 nm. Sin embargo, algunas realizaciones pueden optimizarse para la generación en el segundo Stokes, por ejemplo, maximizando la reflectividad del espejo a 1485 nm.

En algunas realizaciones, el resonador está dispuesto para que la luz Raman 18 siga una trayectoria en zigzag a través del medio Raman para distribuir el calor generado dentro del cristal, lo que puede reducir los efectos térmicos. La luz 12 puede seguir la misma trayectoria en zigzag.

La figura 20 muestra un ejemplo en el que la estructura resonante comprende un resonador de anillo 78, en el que partes similares en forma y/o función a las de la figura 1 se han indicado de manera similar. La estructura de resonancia 78 comprende por lo menos tres espejos 80. Uno de la pluralidad de espejos está configurado para la entrada de luz 12 en la estructura de resonancia para la interacción con el medio Raman 16, y uno de la pluralidad de espejos está configurado para la salida de la luz Raman 18 generada. Los espejos pueden configurarse por medio de un revestimiento de pila dieléctrica adecuado tal como, por ejemplo, que presente cualquier reflectividad adecuada, incluyendo los descritos aquí.

La orientación del cristal seleccionada respecto a la dirección de propagación de la luz Raman generalmente, aunque no necesariamente, depende de la dependencia de ganancia direccional del cristal, y también de las propiedades direccionales de la muestra de diamante formado. La formación por CVD del diamante, por ejemplo, suele ser más

rápida en la dirección $\langle 100 \rangle$. La birrefringencia residual más baja puede estar en direcciones perpendiculares a la formación. Para acceder a una alta ganancia alta y a una pérdida de despolarización más baja, por lo tanto, es más conveniente colocar el eje de luz Raman a lo largo de una dirección $\langle 110 \rangle$ y la polarización paralela a la $\langle 111 \rangle$. La propagación a lo largo de otros ejes es posible sin mayores compromisos de ganancia. Sin embargo, para diseños que requieren una trayectoria de tránsito larga a través del material, puede haber grandes diferencias de costes de acuerdo con las tasas de crecimiento anisotrópico, y debido a las dificultades para pulir caras más duras como la $\{111\}$.

La cantidad de birrefringencia residual en la muestra también influye en el diseño. El uso de cristales con caras Brewster puede provocar grandes pérdidas salvo que el retardo ($\Delta n l / \lambda$) al transitar por el cristal sea mucho menor que $\pi/4$. El uso de caras recubiertas antirreflectantes puede evitar este problema; sin embargo, la despolarización puede reducir la ganancia efectiva y afectar a la pureza de la polarización del haz de salida. Estos efectos se agravan en alta precisión de resonadores, tales como los utilizados en láseres de cw, en los que la vida útil promedio de los fotones en la cavidad corresponde a un gran número de pasadas en el cristal.

La birrefringencia depende de la posición en el cristal, que se cree que es el resultado de las tensiones internas en el cristal. La figura 6 muestra un mapa de birrefringencia para luz que se propaga a través de las caras extremas de un cristal Raman de ejemplo en forma de cristal de diamante. Cada cristal tendrá su propio mapa de acuerdo con las tensiones particulares formadas en ese cristal durante el crecimiento y cualquier recocido posterior. El mapa resalta varias áreas en un cristal con valores de birrefringencia variables y donde la flecha indica las direcciones del eje rápido. Es probable que el funcionamiento del láser sea más eficiente en regiones de menor birrefringencia o en regiones donde la polarización de salida es paralela al eje rápido. En consecuencia, puede ser deseable trasladar el cristal para que la luz Raman se propague a través de una región del medio Raman que tenga una birrefringencia menor que la de otra región del medio Raman. El dispositivo puede tener un medio de traslado 59 acoplado operativamente al medio Raman y operable para trasladar el cristal. El medio de traslado puede tener forma, por ejemplo, de medio de traslado de motor lineal, medio de traslado de tornillo o, en general, cualquier medio de traslado adecuado. Alternativa o adicionalmente, la estructura resonante puede tener una placa de onda opcional 61 dispuesta por lo menos parcialmente para invalidar la birrefringencia de la región del medio Raman a través del cual se propaga la luz Raman.

La figura 4 muestra la potencia de salida de la luz Raman ("Stokes") en función de la potencia de la luz ("luz de bombeo"). Por encima del umbral, la potencia de salida de Stokes aumentó linealmente con la potencia de entrada. La potencia de salida máxima alcanzó 10,1 W con 31 W de potencia de entrada. Por encima del rango de funcionamiento, la potencia residual de bombeo permaneció aproximadamente constante en aproximadamente 10 W. La eficiencia de conversión a la potencia máxima fue de un 31,7%. El parámetro M^2 fue 1,7 para la luz de bombeo y 1,16 para la luz de Stokes. Dado que no se observó caída de potencia, y debido a que el diamante tiene excelentes propiedades térmicas, se espera que puedan generarse potencias de salida mucho mayores aumentando la potencia de bombeo.

Se espera que la potencia de salida aumente con la potencia de entrada hasta que la lente térmica en el cristal Raman crezca al nivel en el que afecta a la eficiencia del láser. La eficiencia del láser puede disminuir para grandes cargas térmicas ya que el tamaño del modo Stokes se reduce empeorando la superposición espacial del modo Stokes con el bombeo, o debido a aberraciones del haz inducidas en la lente térmica. La separación del espejo del resonador puede variar para mejorar la superposición y la eficiencia del láser y, por lo tanto, compensar por lo menos parcialmente el efecto de la lente. Sin embargo, a un cierto nivel de potencia más alto y una lente térmica más potente, el resonador se vuelve inestable para las curvaturas especificadas del espejo y, por lo tanto, el sistema tiene un límite de potencia. Un procedimiento para permitir límites de potencia más altos es utilizar espejos de radio de curvatura más corto. Otro procedimiento es utilizar un tamaño de punto de bombeo más grande en el cristal Raman. La figura 21 muestra la estabilidad de la estructura resonante en función de la deposición de calor en el cristal Raman y el tamaño de la cintura de bombeo para las condiciones del láser de la figura 4. Aquí, el límite de potencia se calculó a partir de la relación entre la deposición de potencia y la potencia de la lente, utilizando la ecuación de la lente térmica de la página 21, y la potencia máxima de la lente calculada para el conjunto de espejos. El uso de tamaños de cintura más grandes permite potencias mucho más elevadas antes de alcanzar el límite de potencia. La gráfica también muestra el caso de cristales iónicos moleculares que tienen límites mucho más bajos de acuerdo con su conductividad térmica más baja.

La medición simultánea de la potencia de bombeo, la potencia residual reflejada de bombeo y la potencia de salida de Stokes generada permitió deducir las pérdidas totales del resonador. A partir del deterioro de bombeo, que representa la diferencia entre el bombeo y el bombeo residual tras la alineación de la estructura resonante, se determinó la potencia acoplada en los campos Stokes y fonones. De la potencia de bombeo deteriorada (21,8 W), se desvía un 14,2% a la excitación de los fonones ópticos (3,2 W) y el resto se atribuye a la generación del campo de Stokes intracavitario (18,7 W). Dado que la salida de Stokes medida (10,1 W) fue de un 54% de Stokes generados, la diferencia (8,6 W) representa la dispersión combinada y la pérdida de absorción parasitaria. La reducción de las

pérdidas por dispersión y absorción puede mejorar el rendimiento. La Tabla 1 es una lista que indica la asignación de energía a través del sistema.

Tabla 1. La asignación de potencia a través del sistema

	Potencia [W]	Fracción de potencia [%]
Potencia de entrada	31,0	
Deterioro de bombeo	21,8	70% de bombeo
Bombeo residual	9,2	30% de bombeo
Stokes generado	18,7	86% de deterioro
Pérdida por fonones	3,2	14% de deterioro
Salida de Stokes	10,1	54% de Stokes generado
Absorción y pérdida de dispersión.	8,6	46% de Stokes generado

5 A potencias de salida superiores a aproximadamente el doble de la potencia umbral, la fracción de pérdida (46%) de la potencia de Stokes generada fue constante en función de la potencia de bombeo, lo que sugiere que dominaron los procesos de absorción lineal y pérdida de dispersión. Utilizando la transmisión del acoplador de salida conocida ($T = 0,4 \pm 0,1\%$), puede calcularse la potencia de Stokes que circula en la cavidad Raman y deducir el coeficiente de absorción y dispersión combinado del diamante a estos niveles de bombeo. El límite superior medio del coeficiente de pérdida de la muestra de diamante se estimó en $0,17 \pm 0,05\%/cm$ a 1240 nm, que se encuentra cerca del valor del coeficiente de absorción típico ($0,1\%/cm$ a 1064 nm) para nitrógeno muy bajo (generalmente no más de aproximadamente 100 ppb) de material.

10 Aunque puede obtenerse una eficiencia ligeramente mayor optimizando el acoplamiento de salida, los resultados de este estudio muestran que la principal limitación para esta configuración es la pérdida de diamante en masa. Suponiendo avances en el proceso de crecimiento del diamante CVD, se espera que la eficiencia del láser Raman (y, en consecuencia, la potencia de una luz de bombeo determinada) mejore sustancialmente en el futuro.

15 El calor depositado en los cristales Raman consiste en la pérdida inelástica debido al cambio Raman, que fue de aproximadamente 3 W para el láser de diamante descrito anteriormente, y la absorción residual (que fue de hasta 8,5 W en el caso anterior). La conductividad térmica superior y el bajo coeficiente de expansión térmica del diamante, combinados con un diseño de resonador concéntrico, actúan para disminuir el impacto de estos efectos a medida que el dispositivo se escala a mayores potencias. El parámetro de alto choque térmico para el diamantes es prometedor para escalar a alta potencia sin daños catastróficos

20 Se espera que puedan utilizarse de manera similar otros medios Raman de alta conductividad térmica, tales como cristales de tungstato, molibdato y vanadatos para obtener altas potencias de luz Raman.

25 En una realización, el diseño de la cavidad externa puede ser un complemento simple aplicable a una variedad de tecnologías de láser de onda continua de alta potencia (incluyendo láseres de fibra de longitud de onda ajustable o fija) para ampliar su rango de longitud de onda a través de cascada de Stokes y conversión armónica posterior opcional.

30 La ganancia relativamente alta, la alta conductividad térmica y el bajo coeficiente de expansión térmica del diamante pueden proporcionar convertidores de longitud de onda de potencia todavía más alta con una ampliación de frecuencia muy baja, alto brillo y calidad de haz, lo que los hace muy adecuados para la conversión armónica posterior. Por ejemplo, la resistencia a la fractura del diamante es relativamente alta. El parámetro de choque térmico R [W/cm] y el límite de potencia para fractura P_{lim} [W] se utilizan a menudo para caracterizar los límites de fractura de cristal para láseres bombeados ópticamente. Estos dos parámetros están relacionados por $P_{lim} = 4 \cdot \pi \cdot R / \alpha$, donde α es la inversa de la longitud del cristal en el que se deposita la mayor parte de la energía. El límite de potencia P_{lim} es la potencia depositada en el cristal cuando puede producirse fractura. Pueden hacerse comparaciones de orden de magnitud con otros materiales. Para vanadato, $R = 4,8 W/cm$, donde para diamante $R = 7 \times 10^4 W/cm$. En consecuencia, P_{lim} para el diamante es de aproximadamente 10^4 veces más elevado.

35 El diamante consiste en dos redes cúbicas centradas en la cara interpenetrantes desplazadas por un cuarto de la diagonal del cubo con propiedades de simetría en la clase de sistema de símbolos internacionales $Fd\bar{3}m$. La celda unitaria contiene 8 átomos en el cubo de dimensión lateral 0,36 nm, y es el más atómicamente denso de todos los sólidos. La simetría y la fuerte unión covalente de la red restringe el espectro del fonón óptico a frecuencias superiores a $1000 cm^{-1}$. De hecho, la temperatura de Debye (2200 K), que marca la temperatura para la cual el número de ocupación de los fonones ópticos se vuelve significativo, excede en gran medida la de la mayoría de los otros materiales aislantes. La resistencia térmica extremadamente baja del diamante y su bajo coeficiente de expansión son consecuencias de la alta temperatura de Debye. El espectro Raman de primer orden contiene sólo la característica de triple degeneración única a $1332,3 cm^{-1}$ correspondiente a los desplazamientos entre las dos redes cúbicas

5 interpenetrantes a lo largo del enlace diagonal de unión. El ancho de línea es de aproximadamente $1,5 \text{ cm}^{-1}$. La simetría obstaculiza la absorción de red de primer orden que normalmente proporciona el límite de transmisión de longitud de onda larga de la mayoría de los materiales. Como resultado, el diamante transmite en todas las longitudes de onda menos que la banda prohibida, con la excepción de la región de $3\text{-}6 \mu\text{m}$ donde la absorción moderada ($<10 \text{ cm}^{-1}$) prevalece como resultado de procesos de múltiples fonones de orden superior permitidos. Tiene una banda ancha (espacio indirecto de $5,47 \text{ eV}$) que proporciona transmisión de hasta 225 nm . Al tratarse de una red cúbica, las propiedades ópticas lineales son isotrópicas.

10 La potencia de salida específica y la longitud de onda requeridas para una aplicación son parámetros que determinan la mejor opción de material Raman. En la Tabla 1 se resumen algunas de las propiedades ópticas y físicas de importancia para el diseño y el rendimiento del láser Raman junto con ejemplos de otros cristales Raman de uso común que representan los nitratos alcalinos (o yodato), tungstatos de un solo metal, tungstatos de doble metal y vanadatos de metal. El tiempo de desfase de fonones T_2 y el ancho de línea $\Delta\nu$ están relacionados a través de $T_2 = (\pi c \Delta\nu)^{-1}$. A primera vista, las características sobresalientes del diamante son su alta conductividad térmica, bajo coeficiente de expansión térmica, amplio rango de transmisión y gran cambio Raman. La capacidad del diamante para ser un importante material láser Raman viene dada por una gran cantidad de otras variables, incluyendo su capacidad para disipar rápidamente el calor, la robustez, la absorción y la dispersión, así como aspectos prácticos tales como la capacidad de fabricación con recubrimientos ópticos robustos. La conductividad térmica puede ser una función de la temperatura y, en general, disminuye para la mayoría de los materiales a temperaturas más altas. Por lo tanto, el uso de materiales de conductividad térmica naturalmente más elevada, por ejemplo, el diamante, puede evitar un "escape térmico" que puede producirse cuando se utilizan otros medios Raman, por lo que un aumento de la temperatura reduce la capacidad del medio Raman para transportar el calor, aumentando todavía más la temperatura del medio Raman.

Tabla 1 Comparación de parámetros de materiales a temperatura ambiente.

Material	Diamante	Silicio	LiIO ₃	Ba(NO ₃) ₂	KGW	BaWO ₄	YVO ₄
Clase de cristal/óptica	Cúbico/ isotrópico	Cúbico/ isotrópico	Hexagonal/ uniaxial	Cúbico/ isotrópico	Monoclínico/ biaxial	Tetragonal/ uniaxial	Tetragonal/ uniaxial
Cambio Raman	1332,3	521	770, 822	1047,3	768,901	926,5	890
Ancho de línea Raman FWHM (cm ⁻¹)	1,5	1,24	5,0	0,4	7,8,5,9	1,6	
T ₂ (ps)	7	8,5	2,1	26	1,4, 1,7	6	3,5
Rango de transmisión (μm)	>0,23	>1,1	0,31-4	0,35-1,8	0,34-5,5	0,28-5	0,4-5
dn/dT (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	15	215	-95 -80		0,4		3 (a) 8,5 (c)
Conductividad térmica (W/mK)	2000	153	4	1,17	2,6[100] 3,8[010] 3,4[001]	2,32 2,26	5,2
Expansión Térmica (x10 ⁻⁶ K ⁻¹)	1,1	3	28 (a) 48 (c)	18,2	4,0 3,6 8,5	8,2 8,9 31,2	4,43
Capacidad térmica (J/gK)	0,52	0,75	0,58	0,6		0,31	
Índice de refracción n a 1,064 μm	2,41	3,42	1,85 (o) 1,72 (e)	1,56	1,98 p 2,01 m 2,06 g	1,84	1,96 2,17
Densidad (g/cm ³)	3,52	2,33	4,5	3,25	7,3	6,4	4,23
Ganancia Raman @ 1064 nm	10-12	(20 @ 1550nm)	4,8	11	3,5	8	4,5
Método de crecimiento	CVD o HPHT	Czochralski o Float Zone	Acuoso	Acuoso	Flux o Czochralski	Czochralski	Czochralski
Densidad (g/cm ³)	3,52			3,25	7,3	6,4	4,24
Número de Poisson	0,069			0,237	0,3 (est)	0,3 (est)	0,33
Módulo de Young (GPa)	1100				115,8 (a) 152,5 (b) 92,4 (c)		
Método de crecimiento	CVD o HPHT	Czochralski o Float Zone	Acuoso	Acuoso	Flux o Czochralski	Czochralski	Czochralski
Resistencia a la fractura (GPa)	4				0,14 (a) 0,102 (b) 0,064 (c)		
Coef. de pérdida combinada @ 1er Stokes (%/cm)	0,2 (20 ppb)			0,2	0,2	0,2	0,2
Coefficiente de ganancia Raman @ 532 nm (cm/GW)	30			47	20 (est.)	35	25 (est.)

Puede ser deseable tener una pérdida por debajo de cierto límite superior para permitir un funcionamiento óptimo. Una estimación para el límite superior puede derivarse de la expresión Pérdida [%] < 100 [exp (2I_{in}g'/λ_s)-1], donde I_{in} es la intensidad de la luz recibida en el cristal, g'/λ_s es el coeficiente de ganancia Raman (donde g' es aproximadamente independiente de la longitud de onda de Stokes λ_s, y l es la longitud del cristal). Puede apreciarse que el límite superior de la pérdida aumenta con la potencia de luz recibida e inversamente con la longitud de onda de Stokes. En un ejemplo, g'/λ = 10 cm/GW, l = 1 cm e I_{in} = 0,8 MW/cm² y la pérdida máxima es 1,6%. Puede utilizarse un acoplamiento de salida de aproximadamente 0,5% con otras pérdidas de resonador de aproximadamente 0,4% por trayectoria de ida y vuelta (pérdidas combinadas de absorción y dispersión en el diamante), dando las pérdidas totales de trayectoria de ida y vuelta de aproximadamente 1%, con un rendimiento satisfactorio.

Con el fin de determinar los límites de potencia aproximados para varios cristales Raman, se calculó la potencia de la lente térmica y su efecto sobre la estabilidad del resonador para varios materiales de ejemplo.

La lente térmica en el cristal se determinó calculando la deposición de calor en el cristal debido a la absorción del cristal Raman y a la generación de los fonones ópticos por el proceso Raman. Se supone que la potencia se convierte en calor en el cristal con la misma dependencia espacial que el haz de Stokes. A partir de la observación y el análisis teórico, y suponiendo que por encima del umbral todos los fotones de bombeo se convierten en Stokes, la salida de Stokes generada para un láser Raman viene dada respecto a una primera aproximación por:

$$P_{total} = \frac{\lambda_p}{\lambda_s} (P - P_{th})$$

5 donde P_{total} es la potencia de Stokes generado dentro de la cavidad, λ_p es la longitud de onda de bombeo, λ_s es la longitud de onda de Stokes, P es la potencia de bombeo (es decir, la potencia de la luz 12) y P_{th} es el umbral de la potencia de bombeo. Debido a las pérdidas de absorción y dispersión en el cristal, la fracción de esta potencia que sale del resonador es

$$P_{out}/P_{total} = \frac{(1 - R_{oc})}{\exp(2\alpha l + 2\ln(1 - L)) - R_{oc}}$$

10 donde P_{out} es la potencia de salida de Stokes, R_{oc} es la reflectividad del acoplador de salida, α es el coeficiente de absorción de diamante, l es la longitud del cristal y L son pérdidas adicionales, por ejemplo, dispersión. La potencia depositada en el cristal P_{dep} está dominada por la pérdida de absorción y la generación de fonones. Debido a que la intensidad de Stokes en el cristal es mucho más elevada que el bombeo, la absorción por parte del bombeo puede no tenerse en cuenta y

$$15 \quad P_{dep} = \frac{P_{out}}{1 - R_{oc}} \cdot (1 - e^{-2\omega i}) + P_{total} \left(\frac{\omega_p}{\omega_R} - 1 \right)$$

20 donde la primera parte representa la pérdida del campo de Stokes intracavitario debido a la absorción y la segunda parte es la pérdida a fonones y depende del cambio material Raman, $\omega_{R,p}$ son las frecuencias angulares Raman y de bombeo. La potencia de la lente térmica en función de P_{dep} es

$$f^{-1} = \frac{P_{dep}}{2\pi k w_0^2} \left(\frac{dn}{dT} + (n - 1)(\nu + 1)\alpha_T \right)$$

25 donde w_0 es el radio del haz, ν es el número de Poisson, n es el índice de refracción, T la temperatura, α_T es el coeficiente de expansión térmica, κ es la conductividad térmica. En la tabla 1 se dan valores aproximados para los distintos materiales.

30 La lente térmica influye en el tamaño del modo en el cristal Raman y puede forzar al resonador a volverse inestable. De acuerdo con lo determinado por el modelo de haz de matriz ABCD, el radio de cintura varía con P_{dep} . La figura 7 muestra la dependencia del radio de cintura de la potencia térmica depositada, siendo las curvas de arriba a abajo corte a de YVO₄, corte b polar a de KGW, corte b polar c de KGW, diamante, BaWO₄, y nitrato de bario. Para permitir la comparación directa de materiales, el cálculo se ha realizado para una curvatura especular fija (radio de 5 cm) con longitud de cristal $l = 1$ cm y con una separación inicial especular (carga de calor cero) que proporciona un radio de cintura de 31 μm .

35 Se aprecia que la cavidad es inestable para P_{dep} mayor que 0,1-1,5W para la mayoría de los materiales, excepto el diamante. Las excelentes propiedades térmicas del diamante permiten más de 35W de calor antes de que la cavidad se vuelva inestable.

40 En las figuras 8 a 14 se representa la potencia de salida y la dependencia de la eficiencia de la potencia de bombeo, derivadas de las ecuaciones anteriores hasta el límite de estabilidad.

45 La potencia de salida máxima que se muestra indica el punto en el que la cavidad se vuelve inestable. Operar el láser a potencias cercanas a estos niveles puede dar como resultado una disminución de la eficiencia y una reducción de la calidad del rayo láser. Pueden obtenerse potencias más elevadas utilizando espejos de mayor curvatura, o colocando recubrimientos especulares en las caras del cristal Raman, o colocando una lente intracavitaria de acción contraria dentro del resonador. Sin embargo, la medida en que estas estrategias son prácticas puede ser limitada. Por ejemplo, espejos revestidos con un radio de curvatura pequeño y un diámetro grande son costosos o poco prácticos de fabricar. Además, por ejemplo, la incorporación de lentes intracavitarias puede elevar sustancialmente el umbral del láser y reducir el rango operativo estable.

55 La potencia de salida también se calculó para el caso con la segunda generación de armónicos intracavitarios del primer Stokes al ultravioleta. En este caso, el resonador consta de altos reflectores a las longitudes de onda de bombeo y Stokes, y el armónico se emite eficientemente desde el resonador (véase, por ejemplo, la figura 15, que muestra el coeficiente de acoplamiento de salida no lineal óptimo para el resonador con diamante). El acoplamiento efectivo de salida de resonador en este caso es una función de la potencia de Stokes.

Los cálculos anteriores comparando materiales se realizaron para el caso de una luz de bombeo verde (532 nm) que produce un primer Stokes amarillo, y en el segundo armónico en el ultravioleta. Los resultados también son indicativos de la potencia y el rendimiento probables para la conversión de longitudes de onda infrarrojas a longitudes de onda infrarrojas de Stokes y a longitudes de onda visibles mediante generación armónica en un medio no lineal situado dentro del resonador.

El bombeo de láseres Raman en las longitudes onda verde puede generar longitudes de onda de Stokes en longitudes de onda amarilla y roja, y en longitudes de onda ultravioleta UV-C y UV-B a través de generación armónica intracavitaria. Ambas regiones de longitud de onda tienen muchas aplicaciones importantes, pero se ha descubierto que son difíciles de generar utilizando otros medios. Ante una realización descrita aquí, las fuentes de láser de cw de alta potencia en ultravioleta eran particularmente difíciles de realizar debido a la falta de elementos estables de conversión de frecuencia casi compatibles en fase para el ultravioleta, o los estrictos requisitos establecidos en el láser fundamental y ópticas de generación armónica en el caso de esquemas de generación de armónicos de cavidades mejorados. El campo intracavitario mejorado a una longitud de onda de Stokes creada por la ganancia Raman puede permitir una conversión eficiente a la radiación UV utilizando SFG y SHG de cuasi ajuste de fase de Tipo I y II convencionales. Esta solución proporciona un procedimiento para desarrollar la tecnología de láser verde de cw maduro, tal como láseres Nd e Yb de segundo armónico, y láseres semiconductores bombeados ópticamente, para generar haces UV de cw con alta eficiencia y alta potencia.

Modelado

El modelado matemático es una herramienta útil para la optimización del rendimiento del láser. El modelo identifica parámetros cuyo cambio puede dar lugar a una mayor potencia de salida o un menor umbral de funcionamiento.

El rendimiento del láser se calculó en función de parámetros de diseño del láser derivando una solución analítica para la potencia de salida de Stokes. Comenzando con ecuaciones acopladas crecimiento y decaimiento de la intensidad para Stokes y bombeo:

$$\frac{dl_{int}^S(r,z)}{dz} = g_R l^P l_{int}^S - \alpha l_{int}^S$$

$$\frac{dl^P(r,z)}{dz} = -g_0 l^P l_{int}^S - \beta l^S,$$

donde I_{int}^S es la intensidad de Stokes en un medio Raman, I^P es la intensidad de bombeo, $g_{0,R}$ es ganancia Raman de señal pequeña a longitud de onda de Stokes y bombeo respectivamente, α y β pérdidas de absorción a longitud de onda de Stokes y bombeo, que son válidas para campos que evolucionan lentamente en comparación con el tiempo de desfase de fonones. Para simplificar el análisis, se considera aquí sólo el caso especial en que la conexión en cascada al segundo Stokes es insignificante. Suponiendo que los perfiles de intensidad que se propagan a través del cristal son gaussianos, y dado que, en la cavidad de Stokes de alta finura, el crecimiento de Stokes a través del cristal para cada trayectoria de ida y vuelta y sus pérdidas debido al acoplamiento de salida y la absorción son pequeñas, se obtiene:

$$P_{in}^P = \frac{\lambda_S}{\lambda_P} \frac{T+2\alpha L}{T} P_{out}^S \left[1 - \exp\left(-\frac{2G}{T} P_{out}^S\right) \right]^{-1},$$

donde P_{in}^P es la potencia de entrada de bombeo, P_{out}^S potencia de salida de Stokes, λ_S , λ_P son longitudes de onda de Stokes y de bombeo, T acoplamiento de salida, L longitud del diamante, α pérdida de absorción del diamante, G ganancia Raman en una geometría enfocada determinada por:

$$G = \frac{\lambda_S}{\lambda_P} \frac{4gs}{\lambda_S + \lambda_P} \operatorname{atan}\left(\frac{L}{b}\right),$$

donde g_s es el coeficiente de ganancia Raman y b un parámetro confocal de bombeo (se supone igual que Stokes).

En la figura 16 se muestra una comparación del modelo con los datos medidos para los parámetros medidos del sistema que se dan en la Tabla A. El modelo predice con precisión el umbral y la eficiencia de la pendiente del láser Raman. Alguna discrepancia entre el modelo y el experimento, particularmente en la potencia residual de bombeo, está producida por suponer una forma gaussiana de bombeo residual. La figura 16 muestra una comparación del modelo con los datos medidos.

Tabla A. Parámetros iniciales del modelo

Parámetro	Valor
Longitud de cristal	9,5 mm
Radio de cintura de bombeo	32 μm
Coefficiente de absorción	0,3 %/cm
Longitud de onda de bombeo	1064 nm
Longitud de onda de Stokes	1240 nm
Ganancia Raman	8,5 cm/GW

5 Para cada nivel de potencia de bombeo, en general, es posible encontrar un acoplamiento de salida que maximice la salida de Stokes. No es posible encontrar una potencia máxima de Stokes de la ecuación (2) en forma analítica. En la figura 17 se muestra una solución numérica para los parámetros que se dan en la Tabla B, que muestra el acoplamiento de salida en función de la potencia de salida de Stokes para diferentes niveles de potencia de bombeo. La línea que se origina en la esquina inferior izquierda muestra un OC óptimo donde, para una salida de Stokes determinada, el bombeo se minimiza.

10 Para el sistema actual utilizando diamante, el OC óptimo se encuentra entre 0,5 y 1% para potencias de salida de 10-20 W.

15 Los parámetros iniciales se enumeran en la Tabla B.

Tabla B. Parámetros iniciales del modelo

Parámetro	Valor
Longitud de cristal	9,5 mm
Radio de cintura de bombeo	25 μm
Coefficiente de absorción	0,1 %/cm
Longitud de onda de bombeo	1064 nm
Longitud de onda de Stokes	1240 nm
Ganancia Raman	8,5 cm/GW

20 Para un OC dado, el modelo predice cómo depende el umbral de generación de los cambios de varios parámetros del sistema. El umbral puede calcularse limitando la salida de Stokes a 0 en la ecuación (2):

$$P_{thr}^p = \frac{T + 2\alpha L}{2g_S \cdot \text{atan}(C)} D$$

$$C = \frac{L}{\sqrt{b_p b_S}} \sqrt{\frac{b_p \lambda_S + b_S \lambda_P}{b_p \lambda_P + b_S \lambda_S}}$$

$$D = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{(b_p \lambda_S + b_S \lambda_P)(b_p \lambda_P + b_S \lambda_S)}{b_p \lambda_S}}$$

25 donde b_p y b_S son parámetros confocales de bombeo y haces Stokes, respectivamente. En la ecuación (4) se permite una solución diferente de los campos de bombeo y Stokes. El parámetro confocal está relacionado con radio de cintura de bombeo y Stokes $w_{0,p,S}$ como:

$$b_{p,S} = \frac{2\pi w_{0,p,S}^2}{\lambda_{p,S}}$$

30 La figura 18 muestra el umbral en función de los parámetros confocales de bombeo y Stokes, para los parámetros que se dan en la Tabla B y OC de un 0,4%. Se predice que la relación óptima de b_p/b_S es 0,4. Esto puede estar relacionado con la relación del radio de cintura como:

$$35 \frac{w_{0P}}{w_{0S}} = \sqrt{0,4 \frac{\lambda_P}{\lambda_S}}$$

lo que sugiere que el radio de cintura de bombeo de 1064 nm debe ser $\sim 0,6$ veces menor que la cintura de Stokes de 1240 nm.

5 Para un enfoque dado, la absorción residual del cristal α aumenta linealmente con la longitud del cristal L (véase ecuación (4)). La señal ganancia pequeña g_s , por otra parte, se multiplica por $\tan(L/b)$ como resultado de un enfoque potente. Para un cristal mucho más largo que el parámetro confocal, \tan se limita a $\pi/2$ y las pérdidas comienzan a dominar. La figura 19 muestra el umbral en función de la absorción y longitud residual del diamante, y la longitud óptima del cristal para los parámetros del láser que figuran en la Tabla B.

10 En la actualidad, las muestras de diamantes presentan una absorción residual de 0,1-0,5%/cm. La longitud óptima prevista del cristal para el caso modelado de la Tabla B es de 7-10 mm. De manera similar, el modelo puede utilizarse para determinar los parámetros óptimos para otros parámetros del sistema, incluyendo otros valores de longitud de onda de bombeo, absorción de cristales y pérdida de dispersión, longitud del cristal, curvaturas especulares y otros cristales Raman.

15 Las predicciones del modelo analítico de umbral y eficiencia de la pendiente concuerdan con el rendimiento medido del láser Raman y pueden utilizarse para la optimización del sistema. Puede encontrarse un acoplamiento de salida óptimo para una potencia de bombeo dada o una salida de Stokes deseada. El umbral puede minimizarse respecto a tamaños de punto de bombeo y Stokes. El modelo también muestra que cristales más largos de 1 cm pueden ser contraproducentes para el material de diamante de absorción total y pérdida de dispersión de aproximadamente más de 0,2%/cm.

20 Unos valores de pérdida de resonador superiores a un 5% son generalmente problemáticos a medida que aumenta la potencia umbral de bombeo y para una potencia de bombeo disponible determinada, el dispositivo se vuelve ineficiente. Para el ejemplo del presente dispositivo 50 de la figura 3 que proporcionaba aproximadamente 10W de salida de Stokes, los solicitantes han determinado que aumentar la pérdida del resonador en la longitud de onda de Stokes de entre un 1,5% y un 5% hará que el umbral aumente aproximadamente 3,3 veces a 36W, lo que es más que la potencia de bombeo disponible para ese sistema. La figura 22 muestra una gráfica bidimensional de la potencia de entrada requerida para generar 10W de luz Raman (potencia de Stokes) en función del acoplador de salida y la pérdida de absorción/dispersión en el diamante en función del modelo/ecuaciones descritas anteriormente (aquí no se tiene en cuenta pérdidas de reflexión de cristal, pero puede suponerse que tales pérdidas están incorporadas en la pérdida de acoplamiento de salida, por ejemplo). La gráfica de la figura 22 muestra que un funcionamiento eficiente de la realización de la figura 3 (o la figura 1) corresponde a la región inferior izquierda de la gráfica, donde el acoplamiento de salida de suma y la pérdida de absorción/dispersión es inferior a aproximadamente un 2%, por ejemplo, no más de un 1,5%. La gráfica indica que, con pérdidas mayores de aproximadamente un 5%, el dispositivo deja de ser práctico en vista de las altas potencias de bombeo requeridas (la potencia de la luz). La gráfica también muestra que el acoplamiento de salida debe ser pequeño en comparación con la pérdida de absorción/dispersión de la trayectoria de ida y vuelta para obtener la mayor eficiencia. Una solución más estricta del haz de bombeo puede permitir que se reduzca el umbral, pero esta solución tiene un beneficio muy limitado debido a la disminución del parámetro confocal y, por lo tanto, a la longitud efectiva del cristal, lo que tendrá un efecto contrarrestante (se hacer referencia a la figura 19). Incluso si se utilizan láseres de bombeo mucho más elevados que 36W, el acoplamiento de salida óptimo sigue estando por debajo de un 5% ya que es necesario aumentar el tamaño del punto de bombeo para evitar una lente térmica muy grande (se hacer referencia a la ecuación para la potencia de la lente térmica en la página 22) o posiblemente también daño cristalino. Para un ejemplo en el que se utiliza un láser de bombeo muy grande para generar 1000W de salida de Stokes, y el área del tamaño del punto se incrementa para asegurar que la intensidad incidente siga siendo aproximadamente igual (por lo tanto, se mejora la lente térmica y se evitan daños), la cifra de pérdida óptima sigue siendo inferior a un 2%, por ejemplo, no más de un 1,5% (véase figura 23). Respecto a las realizaciones de las figuras 1 y 3, por ejemplo, y los resultados del modelo en las figuras 22 y 23, existe cierto margen para aumentar la potencia de bombeo sin cambiar el tamaño del punto, sin embargo, se espera que esto sea posible sólo para un aumento de potencia de factor 2 o 3 antes de que el rendimiento se vea gravemente afectado por el resonador de Stokes que se acerca al límite de inestabilidad.

55 Hay que tener en cuenta que la compensación de la lente térmica en el material Raman puede lograrse mediante la introducción de lentes contrarrestantes en el resonador. Esto podría lograrse en la práctica cambiando la curvatura del resonador, colocando lentes adyacentes al material Raman o colocando superficies curvas en el material Raman. Sin embargo, esta estrategia dará lugar a un aumento del umbral del láser y un rango operativo láser muy reducido para un resonador casi concéntrico. En el caso de superficies curvas en el material Raman, éstas son difíciles de fabricar.

60 Pueden realizarse variaciones y/o modificaciones en las realizaciones descritas sin apartarse del alcance de la invención que se define por las reivindicaciones. Por ejemplo, la fuente de luz puede comprender por lo menos uno de un láser de gas, un láser que tiene iones de neodimio, un láser que tiene iones de iterbio, un láser que tiene iones de holmio, un láser que tiene iones de tulio, un láser que tiene iones de erbio, un sintonizador láser, un láser de fibra, un láser que tiene un medio láser de estado sólido, un láser que tiene medio cristalino a granel, un láser estrecho de

5 ancho de línea, un láser de diodo y un láser de diodo cónico. En general, puede utilizarse cualquier fuente de luz adecuada. La luz puede tener una pluralidad de modos espaciales. La luz puede comprender múltiples haces que entren en el material Raman en diferentes ángulos. Puede utilizarse cualquier fuente de luz adecuada. La estructura resonante puede comprender un etalon. Por lo tanto, las presentes realizaciones deben considerarse en todos los aspectos ilustrativas y no restrictivas.

La técnica anterior descrita aquí, si la hay, no debe tomarse como una admisión de que la técnica anterior forma parte del conocimiento general común en cualquier jurisdicción.

10 En las siguientes reivindicaciones y en la descripción anterior de la invención, excepto cuando el contexto requiera lo contrario debido a un lenguaje expreso o implicación necesaria, la palabra "comprende" o variaciones tales como "comprenden" o "que comprende(n)" se utiliza en un sentido inclusivo, para especificar la presencia de las características indicadas, pero no para impedir la presencia o adición de características adicionales en diversas realizaciones de la invención.

15

REIVINDICACIONES

- 5 1. Dispositivo (30), que comprende una estructura resonante configurada para resonar luz láser Raman de onda continua, incluyendo la estructura resonante:
- 10 un medio Raman (42) que tiene una conductividad térmica superior a 2 W/K/m, estando dispuesto el medio Raman (42) entre un acoplador de entrada (34) y un medio no lineal de segundo orden (44), en el que:
- 15 el acoplador de entrada (34) está configurado para transmitir luz láser de bombeo de onda continua (12) para el medio Raman recibido desde una fuente de luz externa situada externamente al dispositivo (30), siendo el acoplador de entrada (34) reflectante para resonar la luz láser Raman de onda continua generada por una interacción Raman entre el medio Raman (42) y la luz láser de bombeo de onda continua (12); estando dispuesto el medio no lineal de segundo orden (44) dentro de la estructura resonante, y dispuesto para interactuar con la luz láser de bombeo de onda continua (12) y la luz láser Raman de onda continua o con la luz
- 20 láser Raman de onda continua para generar otro láser de onda continua luz (46); e incluyendo la estructura resonante un acoplador de salida (40) configurado para ser altamente transmisor de la otra luz láser de onda continua (46) para que la otra luz láser de onda continua (46) salga de la estructura resonante;
- 25 y en el que un período del ciclo de resonancia de la estructura resonante produce una pérdida de menos de un 5% de la energía de la luz Raman resonante en el período del ciclo de resonancia para facilitar una generación de luz Raman de onda continua, en el que el período del ciclo de resonancia es el tiempo necesario para que la luz láser Raman de onda continua resonante realice una trayectoria de ida y vuelta dentro de la estructura resonante.
2. Dispositivo (30) de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por el hecho de que el medio Raman (42) tiene por lo menos una pérdida de absorción y dispersión que reduce la potencia de la luz Raman resonante en menos de un 2% cuando se pasa a través del mismo.
3. Dispositivo (30) de acuerdo con la reivindicación 1 o la reivindicación 2, caracterizado por el hecho de que comprende una pluralidad de superficies reflectantes separadas.
- 30 4. Dispositivo (30) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por el hecho de que el medio Raman es cristalino y comprende por lo menos un elemento del Grupo IV de la tabla periódica.
5. Dispositivo (30) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por el hecho de que el medio Raman (42) comprende diamante.
- 35 6. Dispositivo (30) de acuerdo con la reivindicación 5, dispuesto para que un vector de polarización de la luz Raman quede alineado con un eje <111> del diamante.
- 40 7. Dispositivo (30) de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por el hecho de que el acoplador de salida (40) de la estructura resonante está dispuesto para pasar por lo menos un 50% de la otra luz láser de onda continua (46).
8. Dispositivo (30) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por el hecho de que la estructura resonante comprende un resonador de anillo.
- 45 9. Dispositivo (30) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, configurado de manera que el diámetro de la luz láser de bombeo de onda continua es entre 0,5 y 0,7 veces más pequeño que el diámetro de la luz Raman dentro del medio Raman (42).
- 50 10. Dispositivo (30) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por el hecho de que comprende un medio de traslado del medio Raman que puede accionarse para trasladar el medio Raman para controlar el efecto de birrefringencia del medio Raman sobre la luz Raman.
11. Dispositivo (30) de acuerdo con la reivindicación 5, configurado de manera que un radio de cintura de la luz láser de bombeo de onda continua dentro del medio Raman (42) se encuentra en el rango entre 31 micras y 60 micras.
- 55 12. Dispositivo (30) de acuerdo con la reivindicación 5, caracterizado por el hecho de que un eje rápido de la birrefringencia del medio Raman medida en la dirección de propagación es paralelo a un eje <111> del diamante.
- 60 13. Sistema láser que comprende un dispositivo (30) de acuerdo con la reivindicación 1 y una fuente de luz externa, caracterizado por el hecho de que el dispositivo y la fuente de luz externa están dispuestos de manera cooperativa para que el dispositivo (30) reciba la luz láser de bombeo de onda continua (12) desde el exterior fuente de luz, en el que la fuente de luz externa comprende por lo menos uno de un láser de gas, un láser que tiene iones de neodimio,

un láser que tiene iones de iterbio, un láser que tiene iones de holmio, un láser que tiene iones de tulio, un láser que tiene iones de erbio, un láser sintonizable, un láser de fibra, un láser semiconductor bombeado ópticamente, un láser de vapor alcalino bombeado por diodo, un láser químico, un láser que tiene un medio láser de estado sólido, un láser que tiene un medio cristalino en masa, un láser de ancho de línea estrecho, un láser de diodo, y un láser de diodo cónico.

14. Sistema láser de acuerdo con la reivindicación 13, caracterizado por el hecho de que la fuente de luz externa está dispuesta para proporcionar luz láser de bombeo de onda continua (12) que tiene un ancho de línea menor o aproximadamente igual al ancho de línea de ganancia del medio Raman (42).

15. Procedimiento que comprende convertir luz láser de bombeo de onda continua (12) en luz láser Raman de onda continua, comprendiendo el procedimiento las etapas de:

transmitir la luz láser de bombeo de onda continua (12) a través de un acoplador de entrada (34), en el que la luz láser de bombeo de onda continua (12) se recibe desde una fuente de luz externa situada externamente desde un dispositivo (30), incluyendo el dispositivo (30) una estructura resonante, en el que la estructura resonante está configurada para resonar la luz láser Raman de onda continua e incluye un medio Raman (42) dispuesto entre el acoplador de entrada (34) y un medio no lineal de segundo orden (44);

interactuar la luz láser de bombeo de onda continua (12) con el medio Raman (42) para generar la luz láser Raman de onda continua, siendo el acoplador de entrada (34) reflectante para resonar la luz láser Raman de onda continua, presentando el medio Raman (42) una conductividad térmica superior a 2 W/K/m;

interactuar la luz láser Raman de onda continua resonante y la luz láser de bombeo de onda continua (12) o la luz láser Raman de onda continua con un medio no lineal de segundo orden (44) para generar otra luz láser de onda continua (46), en el que el medio no lineal de segundo orden (44) está dispuesto dentro de la estructura resonante, y un acoplador de salida (40) está incluido en la estructura resonante y el acoplador de salida (40) está configurado para ser altamente transmisivo de la otra luz láser de onda continua (46) para que la otra luz láser de onda continua (46) salga de la estructura resonante; y

resonar la luz láser Raman de onda continua generada de modo que menos de un 5% de la energía de la luz Raman resonante se pierde en el período del ciclo de resonancia de la luz Raman resonante para facilitar la generación de luz láser Raman de onda continua, en el que el período del ciclo de resonancia es el tiempo necesario para que la luz láser Raman de onda continua resonante realice una trayectoria de ida y vuelta dentro de la estructura resonante.

16. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 15, caracterizado por el hecho de que el medio Raman (42) es cristalino y comprende por lo menos un elemento del Grupo IV de la tabla periódica.

17. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 15 o la reivindicación 16, caracterizado por el hecho de que el medio Raman (42) comprende diamante.

18. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 15 a 17, caracterizado por el hecho de que el diámetro de la luz láser de bombeo de onda continua (12) es entre 0,5 y 0,7 veces menor que el diámetro de la luz Raman dentro del medio Raman (42).

19. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 15 a 18, caracterizado por el hecho de que comprende la etapa de trasladar el medio Raman (42) para controlar el efecto de birrefringencia del medio Raman sobre la luz Raman.

20. Procedimiento de acuerdo con por la reivindicación 17, caracterizado por el hecho de que un eje rápido de la birrefringencia del medio Raman medida en la dirección de propagación es paralelo a un eje <111> del diamante.

21. Sistema láser que comprende:

un dispositivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12, y una fuente de luz externa situada externamente del dispositivo (30), caracterizado por el hecho de que la fuente de luz externa está configurada para emitir la luz láser de bombeo de onda continua (12).

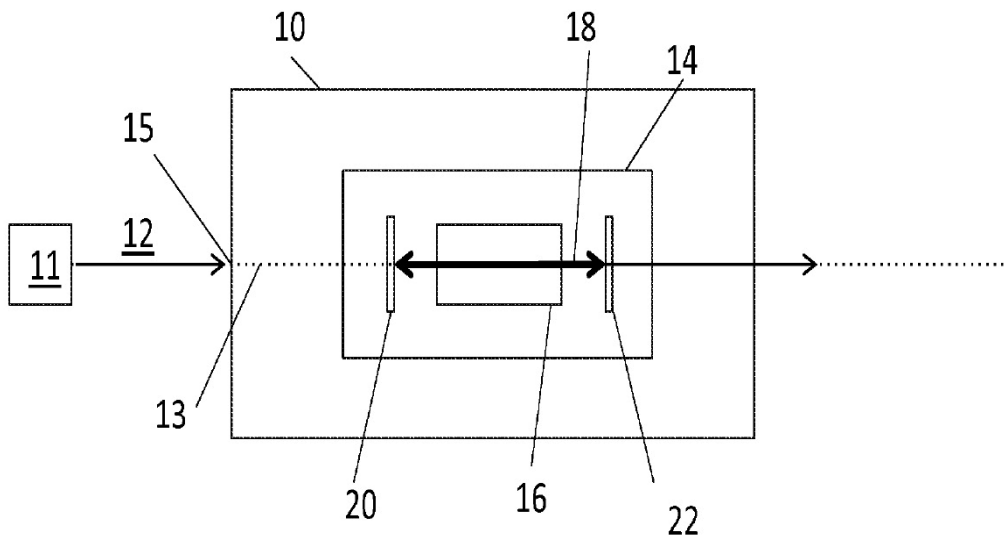


Figura 1

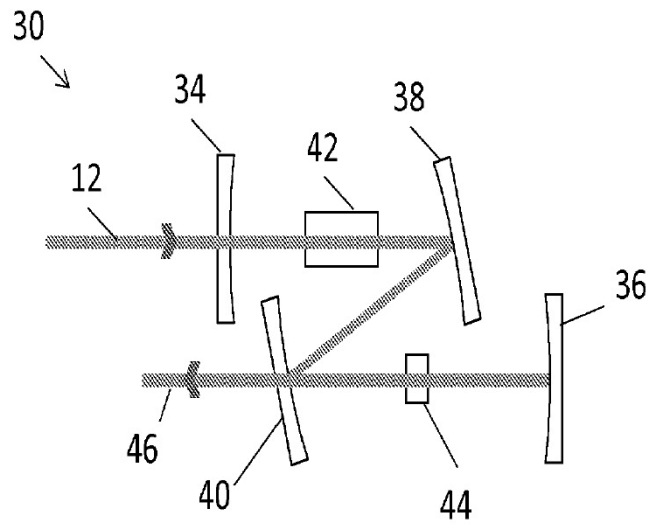


Figura 2

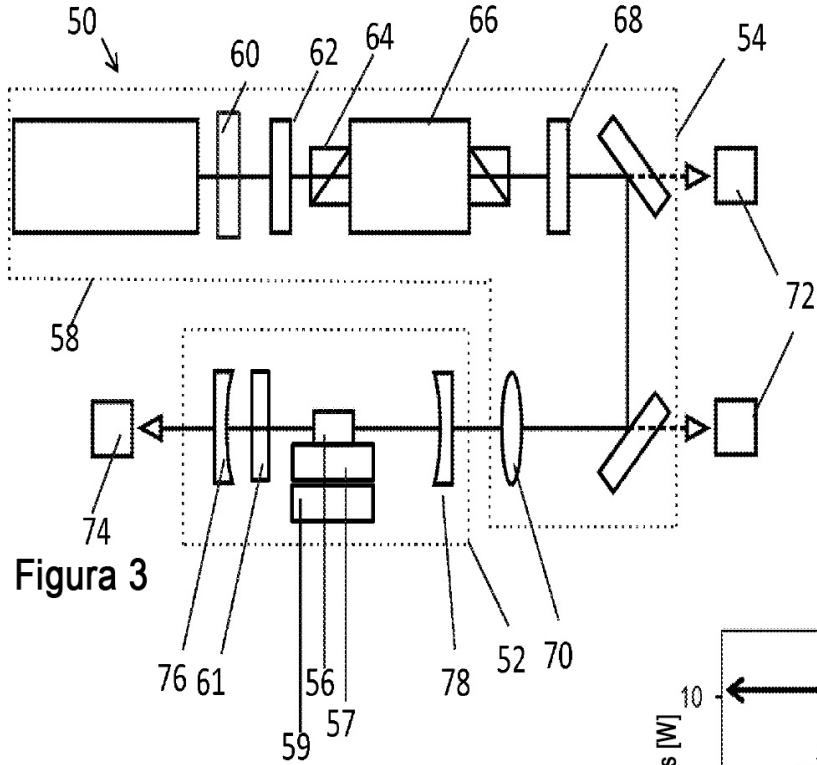


Figura 3

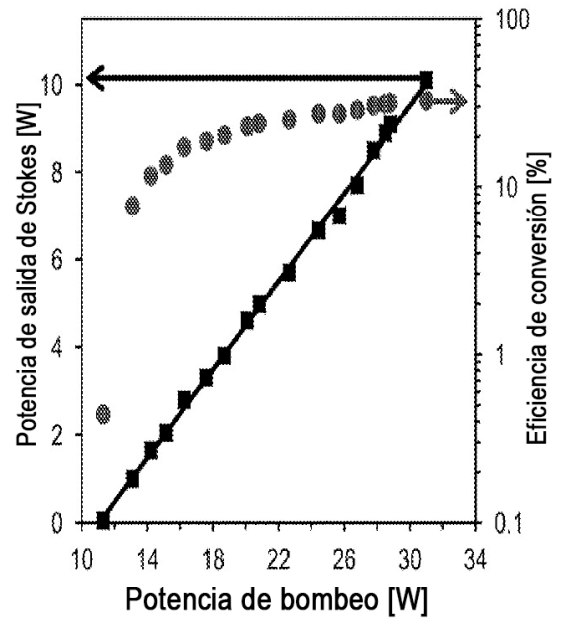


Figura 4

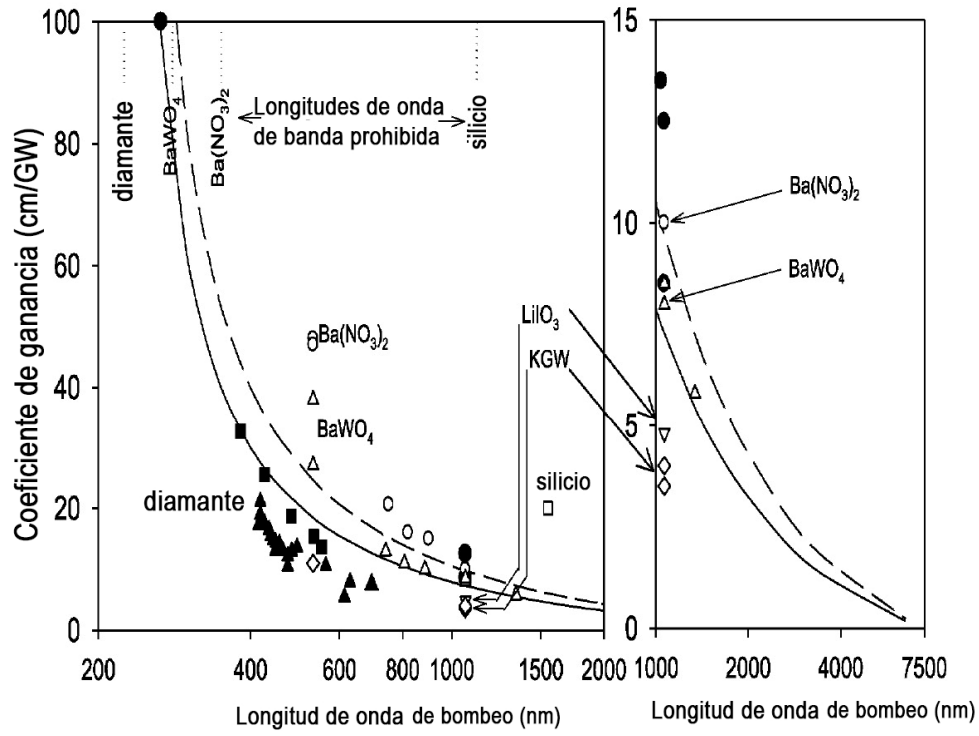


Figura 5

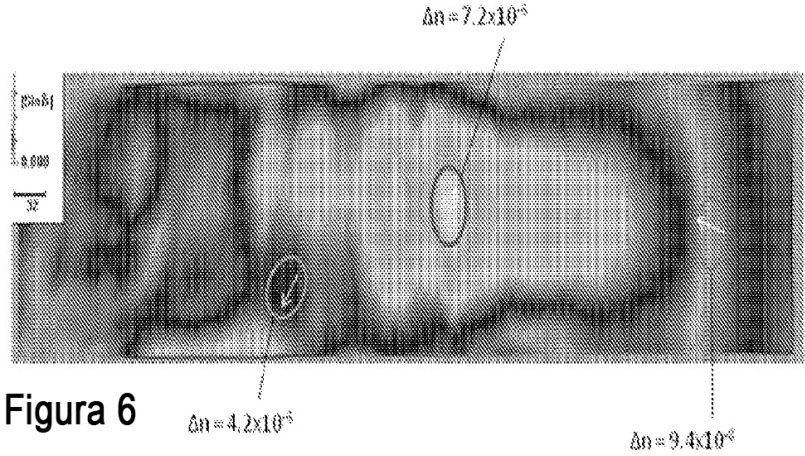


Figura 6

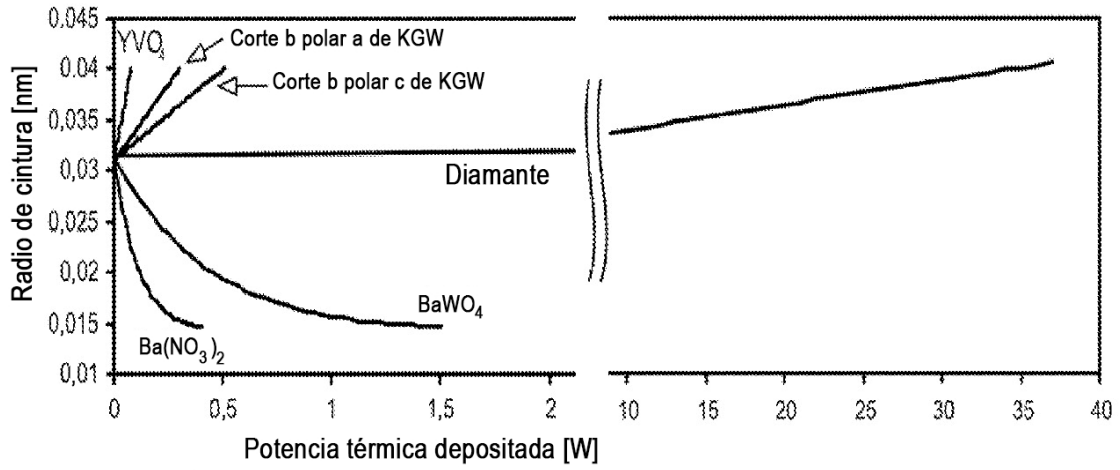


Figura 7

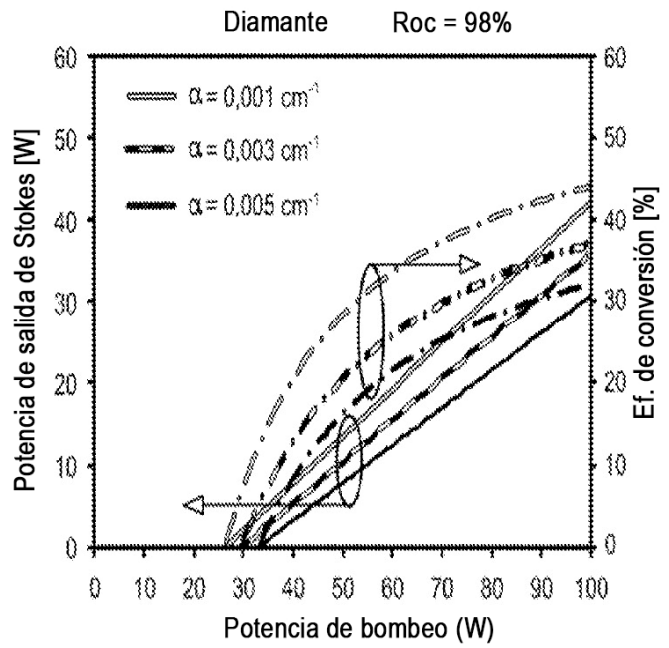


Figura 8

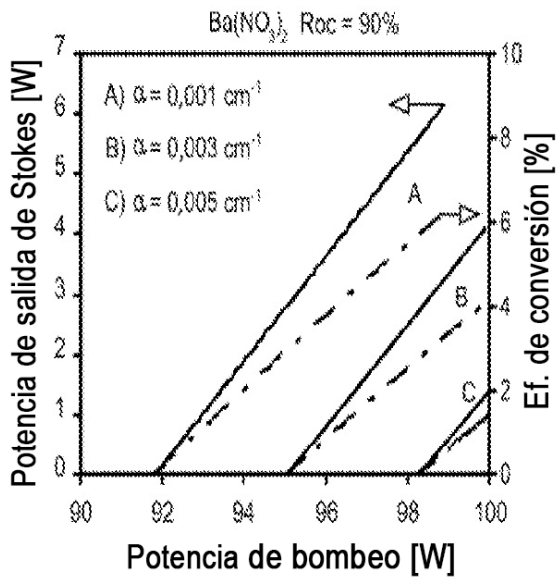


Figura 9

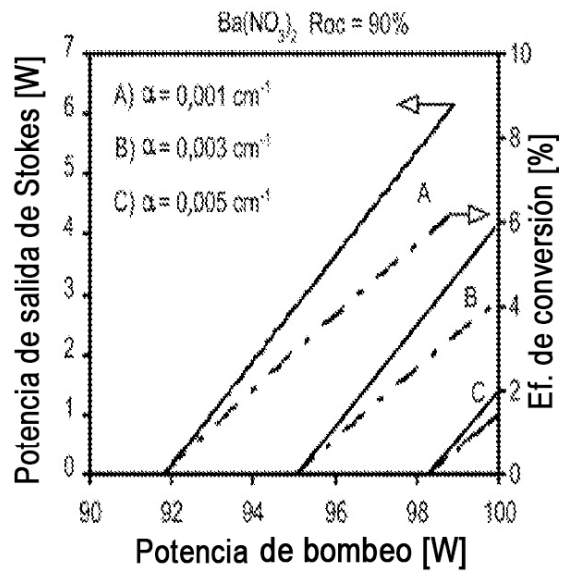


Figura 10

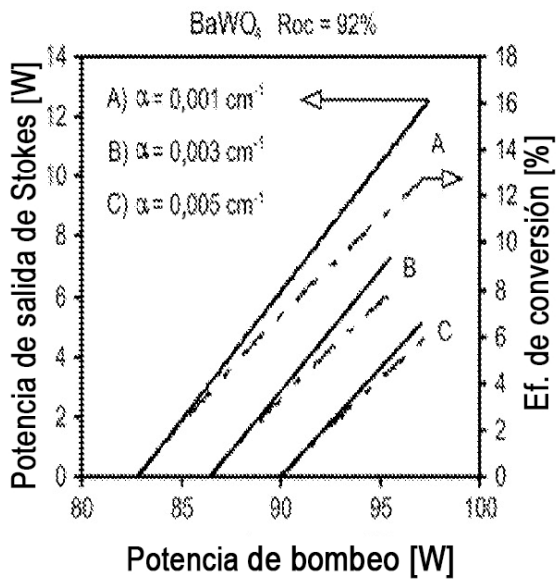


Figura 11

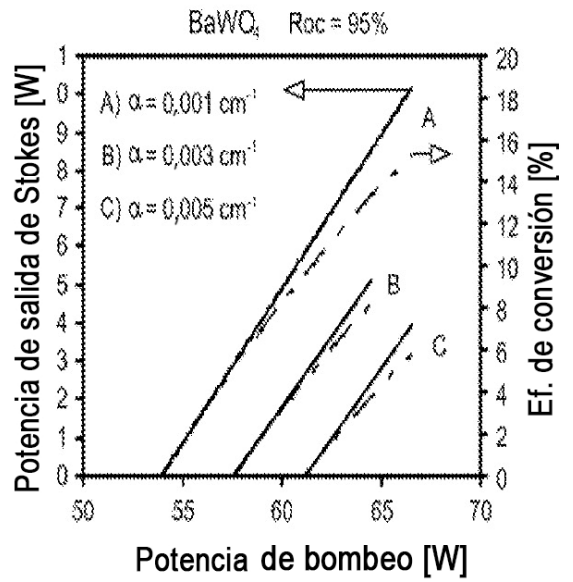


Figura 12

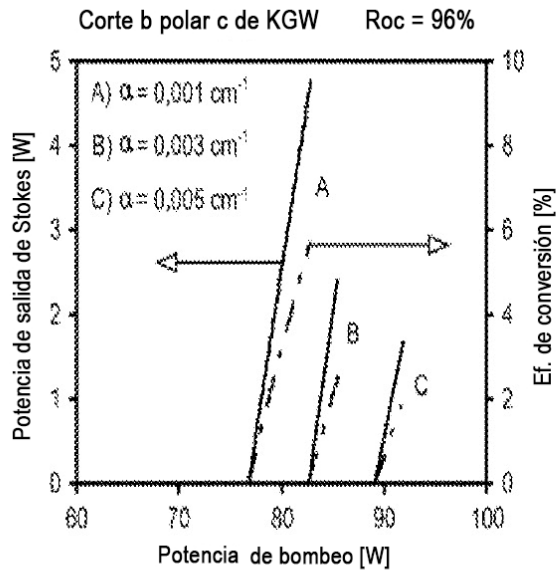


Figure 13

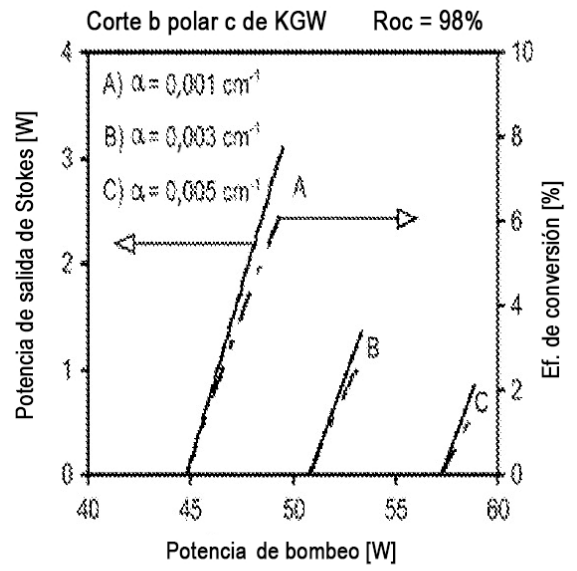


Figure 14

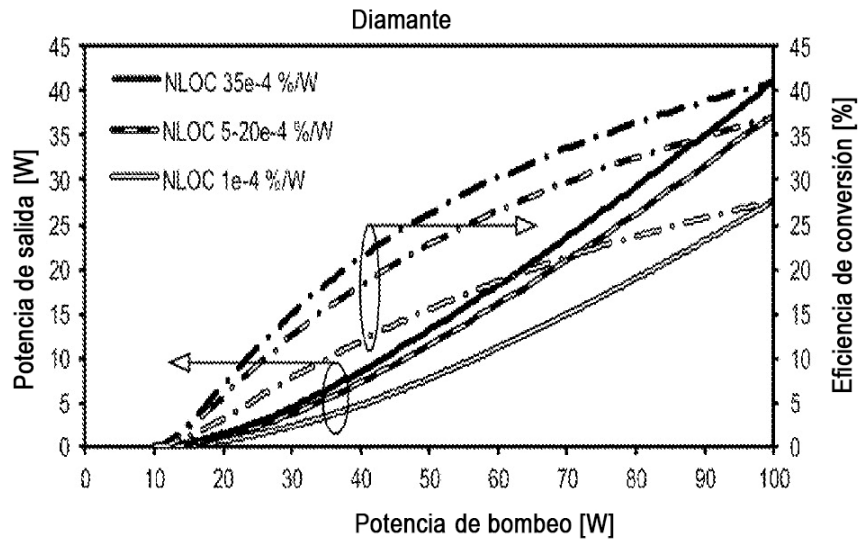


Figura 15

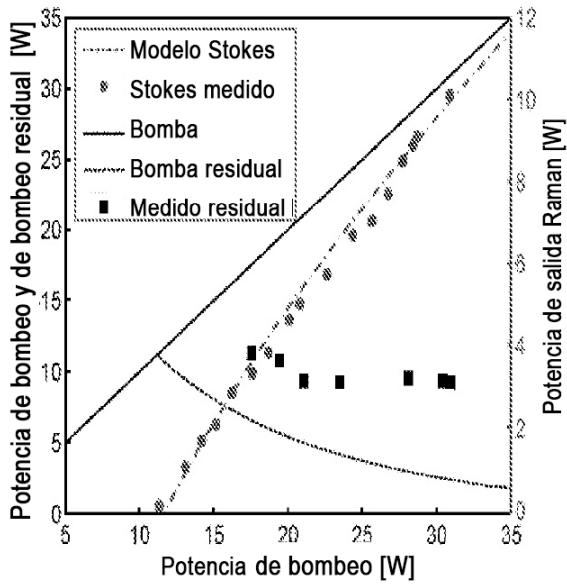


Figura 16

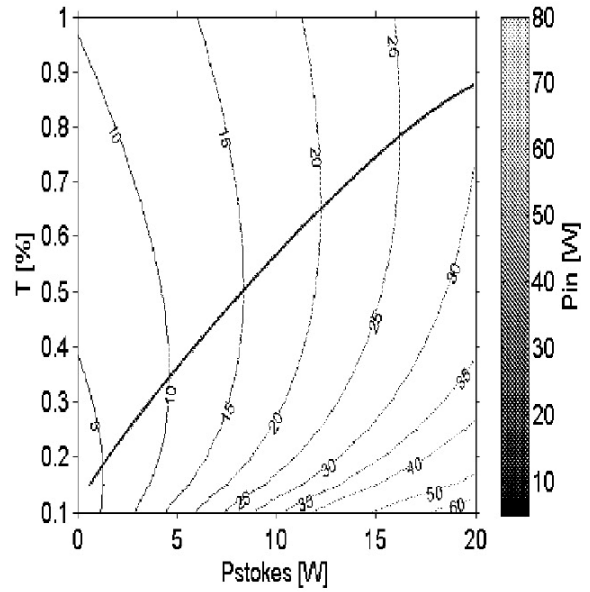


Figura 17

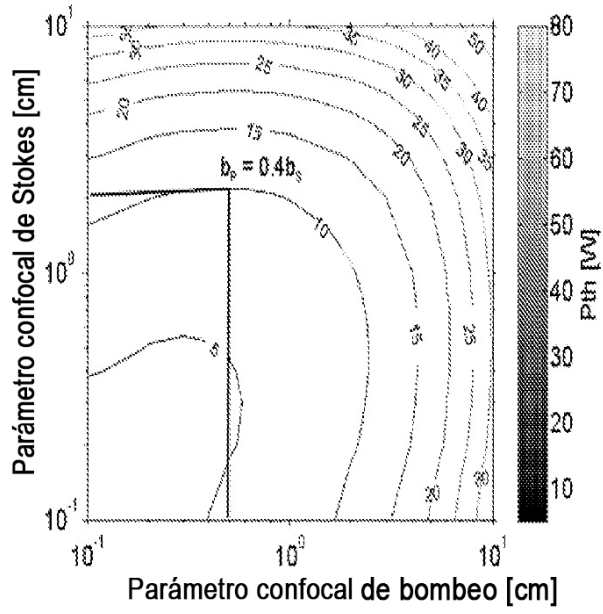


Figura 18

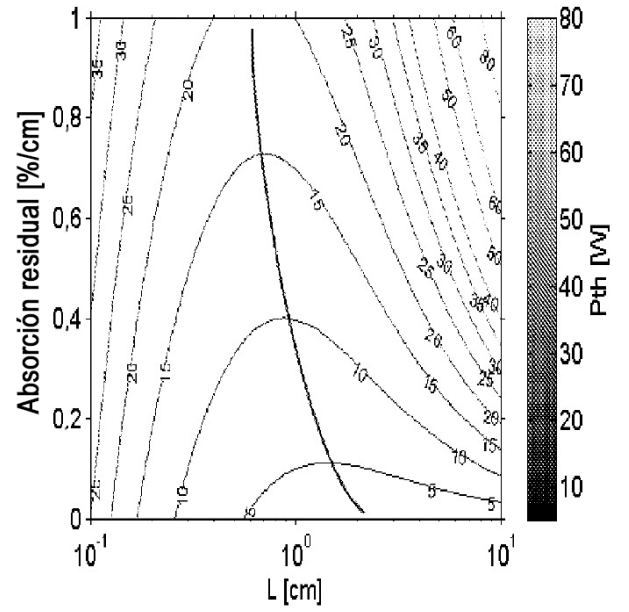


Figura 19

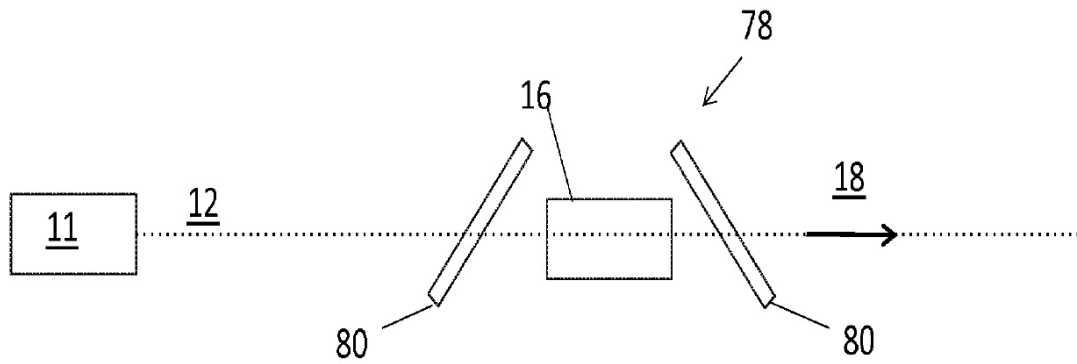


Figura 20

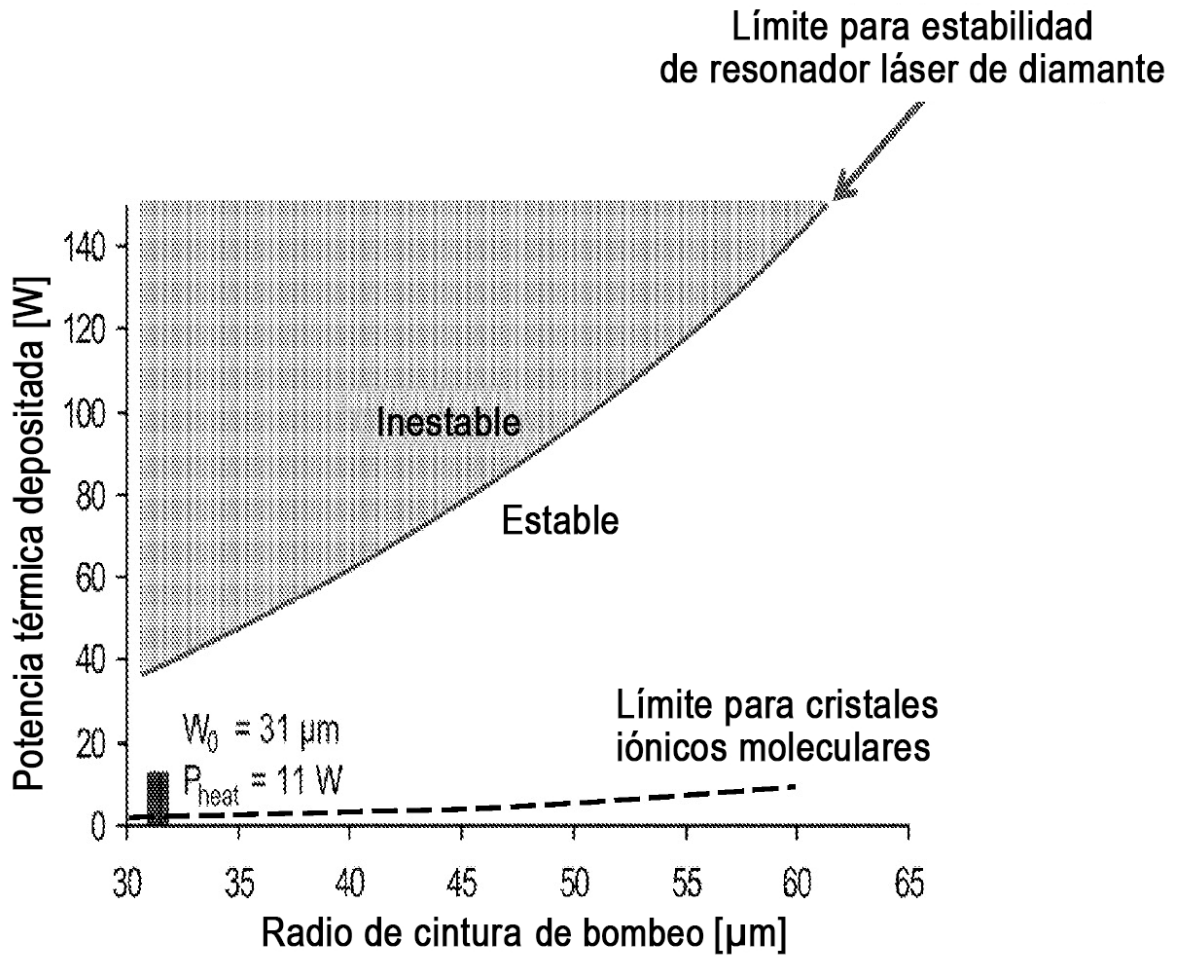


Figura 21

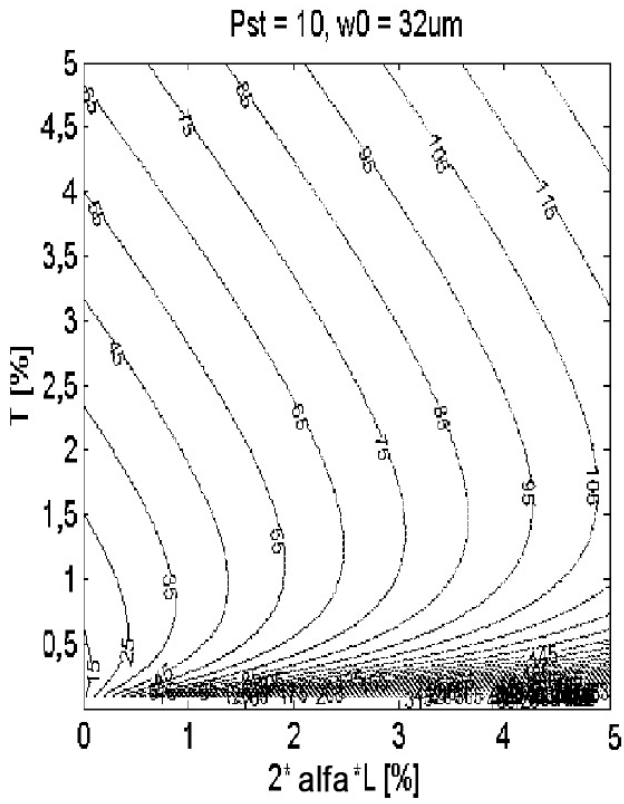


Figura 22

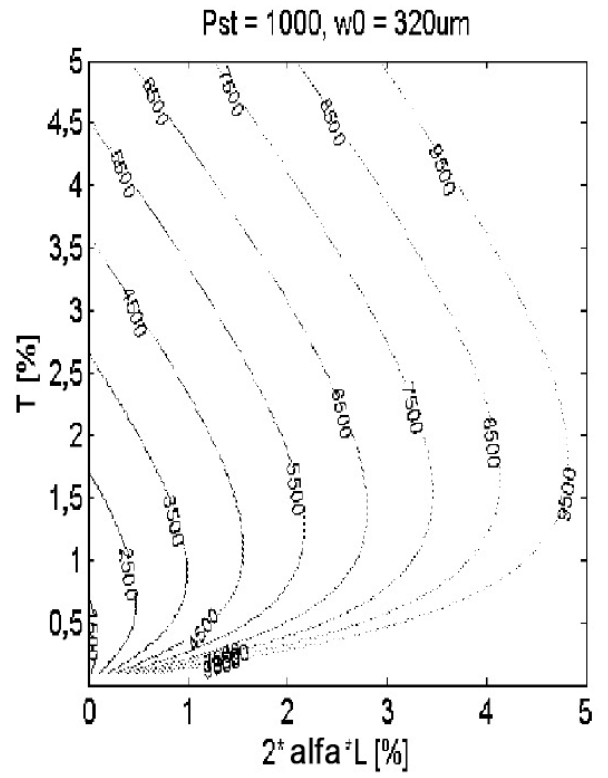


Figura 23

REFERENCIAS CITADAS EN LA DESCRIPCIÓN

5 *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

10 • WO 2006058381 A1 [0004] • US 5673281 A [0004]

Literatura no de patentes citada en la descripción

15 • SOLID-STATE RAMAN LASER GENERATING DISCRETELY TUNABLE ULTRAVIOLET BETWEEN 266 - AND 320 NM. MILDEN R P et al. OPTICS LETTERS. OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, 01 April 2007, vol. 32, 814-816 [0004]