

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 773 311**

51 Int. Cl.:

**G02F 1/39** (2006.01)

**H01S 3/082** (2006.01)

**H01S 3/108** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **26.01.2007 PCT/GB2007/000292**

87 Fecha y número de publicación internacional: **02.08.2007 WO07085859**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.01.2007 E 07705059 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.11.2019 EP 1977285**

54 Título: **Generación paramétrica utilizando cavidades intersecantes**

30 Prioridad:

**26.01.2006 GB 0601596**

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

**10.07.2020**

73 Titular/es:

**M-SQUARED LASERS LIMITED (100.0%)  
Venture Building, 1 Kelvin Campus, West of  
Scotland Science Park, Maryhill Road  
Glasgow, G20 0SP Scotland, GB**

72 Inventor/es:

**DUNN, MALCOLM, H.;  
RAE, CAMERON, F.;  
EDWARDS, TOM, J.;  
STOTHARD, DAVID, J., M. y  
WALSH, DAVID**

74 Agente/Representante:

**PONS ARIÑO, Ángel**

ES 2 773 311 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

Generación paramétrica utilizando cavidades intersecantes

- 5 La presente invención se refiere a la generación paramétrica de radiación electromagnética en la que un material no lineal cuando es bombeado por energía luminosa produce radiación de diferentes longitudes de onda a la de la energía de la bomba, y en particular radiación que está fuera del rango de transparencia normalmente aceptado del material no lineal.

10 **Antecedentes de la presente invención**

- 15 Los dispositivos paramétricos son fuentes flexibles y convenientes de radiación coherente ampliamente ajustable, abarcando todas las escalas de tiempo desde el pulso de femtosegundo hasta la onda continua. En estos, un haz coherente de radiación electromagnética denominado onda de bomba se usa para estimular un proceso no lineal en un material no lineal (óptico), resultando en la división de la energía / potencia en la bomba coherente en dos ondas generadas, típicamente denominadas ondas de señal y locas. La onda de señal generalmente se define como la onda que proporciona la salida útil del dispositivo, aunque ese no es siempre el caso. En la presente solicitud, la onda de señal tiene la longitud de onda más larga de las dos ondas generadas.

- 20 Los dispositivos paramétricos pueden operar en una variedad de configuraciones, incluidos amplificadores, osciladores y generadores. En un amplificador paramétrico, se hace que una onda de bomba intensa y coherente interactúe con el material no lineal para producir amplificación en las longitudes de onda de señal y loca. Un oscilador paramétrico utiliza un amplificador paramétrico dentro de una cavidad resonante en una o ambas de las ondas de señal y loca. En este caso, las ondas de señal / locas se inician automáticamente a partir de ruido / fluorescencia paramétrica o la  
25 cavidad se siembra por inyección mediante una fuente adecuada que funciona en la longitud de onda de señal / loca.

- Los osciladores que resuenan solo en una de las longitudes de onda de señal y loca se denominan resonantes individuales, mientras que los que resuenan en ambas se denominan osciladores doblemente resonantes. Como está bien establecido en la bibliografía, el oscilador doblemente resonante tiene la ventaja de un umbral de oscilación  
30 significativamente más bajo en términos de la potencia / energía de la bomba requerida para que el oscilador entre en oscilación en comparación con el oscilador resonante individual. Sin embargo, el oscilador doblemente resonante tiene serias desventajas en términos de lograr una sintonización suave y continua de las ondas de señal / locas.

- Los generadores paramétricos generan ondas de señal / locas mediante la interacción de una onda de bomba intensa con un material no lineal para producir paraméricamente estas otras dos ondas. No se proporciona cavidad para estas  
35 ondas de conversión descendente ya que la ganancia paramétrica en este caso es lo suficientemente alta como para permitir la transferencia adecuada de energía / potencia a estas ondas con solo un paso simple (o múltiple) no resonante de las ondas de señal y/o locas a través del material no lineal. Nuevamente, en este caso, las ondas de señal y/o locas se inician automáticamente a partir del ruido / fluorescencia paramétrica o el generador se siembra por  
40 inyección mediante una fuente adecuada que opera en las longitudes de onda de señal y/o locas.

- Existe un considerable interés en extender la cobertura espectral de los dispositivos paramétricos. Esto se debe a que a menudo se usan como fuentes de radiación electromagnética coherente en regiones espectrales que no están cubiertas por ninguna otra fuente o donde una sola fuente de onda paramétrica es capaz de reemplazar una serie de  
45 fuentes que de otro modo serían necesarias para proporcionar la cobertura espectral requerida. Sin embargo, una seria limitación encontrada al intentar extender la cobertura espectral de la generación paramétrica a nuevos regímenes del espectro electromagnético es el efecto perjudicial de la absorción dentro del material no lineal de una o más de las tres ondas involucradas en la interacción no lineal. En efecto, la cobertura espectral que se puede lograr con un esquema de generación paramétrica particular a menudo está determinada por el inicio de dicha absorción en  
50 lugar de por las características no lineales o de coincidencia de fase del material no lineal. Por ende, se deduce que la eliminación de dicha restricción daría como resultado una mejor cobertura espectral que se puede lograr a través del proceso de generación paramétrica.

- Una solución al problema de la absorción es emplear una configuración de ondas interactivas de manera que la onda  
55 sujeta a una absorción excesiva salga del material no lineal tan rápido como sea posible después de su generación. Esta onda suele ser, pero no siempre, la onda de señal. Un método para hacer esto se basa en el uso de la coincidencia de fase no colineal de tal manera que la onda sujeta a absorción se aleje rápidamente del material no lineal en una dirección que es sustancialmente lateral a la dirección de propagación de la onda de bomba. Esto se ilustra en la Figura 1, que muestra la geometría de las ondas de bomba interactiva 1, loca 2 y de señal 3 en un material no lineal  
60 4. La Figura 2 muestra el proceso de coincidencia de fase a través de un llamado diagrama de vector  $k$  donde  $k_p$ ,  $k_l$ ,  $k_s$  son los vectores de onda de la bomba, loca y señal respectivamente dentro del material no lineal, ángulo  $\theta$  es el ángulo delimitado por las ondas de bomba 1 y loca 2 y el ángulo  $\phi$  el ángulo delimitado por la onda de bomba 1 y la onda de señal 3. Al alterar el ángulo  $\theta$  entre las ondas de bomba 1 y loca 2, la onda de señal se puede sintonizar rápidamente en un amplio rango.

- 65 Para mantener la interacción no lineal necesaria entre la onda de bomba 1 y la onda loca 2 de las Figuras 1 y 2, deben

tener una extensión radial (transversal) suficiente para mantener la superposición entre ellas a lo largo de la longitud del material no lineal. La ganancia paramétrica se escala con la extensión radial de estos haces. Como consecuencia de la limitación impuesta a la interacción entre las tres ondas debido al desplazamiento lateral de la onda de señal, la extensión radial de los haces debe ser del orden de la longitud de absorción de la onda de señal en el medio no lineal para optimizar la ganancia experimentada por la onda loca 2.

Los ejemplos de la técnica de las Figuras 1 y 2 se describen en los artículos "Emisión eficiente, óptica y sintonizable de LiNbO<sub>3</sub> sin resonador", por Yarborough et al, Applied Physics Letters 15(3), páginas 102-4 (1969); "Generación coherente de ondas THz ajustables a partir de LiNbO<sub>3</sub> con acoplador de rejilla monolítico", por Kawase et al, Applied Physics Letters 68(18), páginas 2483-2485 (1996); y "Fuente paramétrica de onda de Terahercios" por Kawase et al, Journal of Physics D: Applied Physics 35(3), páginas R1-14 (2002), cuyos contenidos se incorporan por referencia en el presente documento.

Un problema con la disposición de las Figuras 1 y 2 es que debido a la interacción reducida entre las tres ondas, el umbral de oscilación aumenta en comparación con los dispositivos convencionales donde todas las ondas son colineales. Esto tiene las consecuencias indeseables de limitar la aplicabilidad de la técnica a materiales que exhiben altos coeficientes no lineales, además de requerir ondas de bombeo de alta energía / potencia y, por lo tanto, exigir el uso indeseable de láseres de alta energía / potencia. Este último requisito impide el desarrollo de versiones compactas y portátiles de estos dispositivos, limitando así su utilidad.

Un enfoque alternativo al ilustrado en las Figuras 1 y 2 es disponer que las ondas de bomba 1 y loca 2 se propaguen colinealmente a través del material no lineal 4 mientras se mantiene la propagación sustancialmente lateral de la onda de señal 3. Esta condición de operación se efectúa mediante el uso de un cristal periódicamente polarizado de tipo de banda inclinada como material no lineal. La Figura 3 ilustra este proceso híbrido colineal / no colineal de coincidencia de fase. La Figura 4 ilustra el proceso de coincidencia de fase a través de un diagrama de k-vector, en el que K es el vector de rejilla que describe el cristal de banda inclinada, no lineal periódicamente polarizado. Se describen ejemplos de esta técnica en la solicitud de patente internacional en trámite PCT / GB2005 / 002912, cuyos contenidos se incorporan por referencia en el presente documento.

En este caso, la presencia del vector adicional K permite que las ondas de bomba 1 y loca 2 se propaguen colinealmente dentro del cristal no lineal 4, mientras que la onda de señal sale sustancialmente lateralmente según sea necesario. De hecho, es evidente que puede disponerse de manera que la onda de señal 3 se propague ortogonal a las ondas de bomba colineal 1 y loca 2. Tener las ondas de bomba 1 y loca 2 colineales significa que se pueden usar elementos comunes tales como, pero sin limitarse a, espejos para la guía o resonancia de estas ondas. Esto puede simplificar disposiciones de lo contrario complicadas. Además, el enfoque de camino común asociado con la propagación colineal de las ondas de bomba 1 y loca 2 confiere la ventaja de una mayor estabilidad geométrica / mecánica.

Si bien la disposición ilustrada en las Figuras 3 y 4 confiere algunas ventajas técnicas, porque requiere que la fijación de la dirección de propagación de la onda loca 2 sea colineal con la dirección de propagación de la onda de bomba 1, se pierde la capacidad de lograr una sintonización amplia y continua del proceso paramétrico mediante el uso de la sintonización angular.

Con el fin de minimizar la potencia de la bomba externa requerida para alcanzar el umbral de oscilación, un enfoque adoptado en la técnica anterior es colocar el oscilador paramétrico óptico dentro de la cavidad del láser utilizado para generar la onda de bomba y de tal manera que las tres ondas sean colineales dentro del cristal no lineal, una disposición generalmente denominada oscilador paramétrico óptico intracavitario. Debido a que el medio no lineal experimenta una onda de bomba con la intensidad asociada con el campo de radiación interno del láser de bomba, que generalmente es sustancialmente mayor que el campo de radiación externo disponible bajo un acoplamiento de salida óptico del mismo láser de bomba, los requisitos de energía y potencia del láser de bomba se relajan significativamente, lo que lleva a dispositivos más compactos. Los ejemplos de esto se describen en los documentos US 3.628.186; US 5.117.126; GB 2.252.840 A; US 5.195.104; US 5.181.211; US 5.291.503; WO 94/24735; y EP 0 644 636 A2, cuyos contenidos se incorporan por referencia en el presente documento. Sin embargo, ninguno de los sistemas descritos en estos permite la salida rápida de la onda de señal requerida del material no lineal, simultáneamente con sintonización amplia y continua.

### Sumario de la invención

De acuerdo con la presente invención, se proporciona un dispositivo paramétrico que tiene un material no lineal para generar ondas locas y de señal en respuesta a una onda de bomba, siendo las ondas de bomba, loca y de señal no colineales, teniendo el dispositivo una cavidad resonante en la longitud de onda de la bomba y medios para variar el ángulo entre las direcciones de propagación de las ondas de bomba y loca.

La presente invención proporciona una cavidad para hacer que la onda de bomba resuene. El dispositivo está dispuesto de manera que exista una superposición espacial adecuada de las ondas de bomba y loca alrededor del punto de intersección. El material no lineal se coloca adecuadamente en esta región de superposición. Se proporcionan

medios para alterar el ángulo entre la dirección de propagación de las ondas de bomba y loca para proporcionar una sintonización amplia y continua de la onda de señal, mientras se mantiene el grado requerido de solapamiento de las ondas de bomba y loca y el desplazamiento lateral requerido de la onda de señal.

5 La dirección de la onda loca puede definirse por una cavidad diseñada para hacer resonar la onda loca. Se puede permitir que la onda loca defina su propia dirección de propagación a través del medio de ganancia no lineal. Esta dirección de propagación puede definirse mediante la inyección de una onda de siembra en la longitud de onda de la onda loca en el medio de ganancia no lineal.

10 La cavidad de la onda de bomba puede contener uno o más componentes necesarios para el funcionamiento del láser de bomba, por ejemplo un medio de ganancia de onda de bomba. Esto se conoce como una geometría generadora de bomba.

15 Como alternativa, la cavidad de onda de bomba puede mantenerse en resonancia por medio de sistemas de servocontrol adecuados para mejorar de manera resonante una onda de bomba generada usando un láser de bomba externo a la cavidad, pero acoplado a la cavidad mediante ópticas adecuadas de emparejamiento de modo/aislamiento. Esto se conoce como geometría de mejora de bomba.

20 La presente invención proporciona un sistema que reduce la potencia / energía de la bomba requerida para alcanzar el umbral de oscilación, y permite que el material no lineal experimente el campo intracavitario del láser de bomba o el campo resonantemente mejorado del láser de bomba, mientras que al mismo tiempo evita las desventajas de la falta de sintonización angular y el desplazamiento lateral del haz de la onda de señal.

#### Breve descripción de los dibujos

25 Varios aspectos de la invención se describirán ahora con referencia a los dibujos adjuntos, de los que:

la Figura 5 es un diagrama esquemático de un oscilador paramétrico basado en una geometría generadora de bomba con cavidades de onda de bomba y de onda loca intersecantes;

30 la Figura 6 es un diagrama esquemático de un oscilador paramétrico basado en una geometría de mejora de la bomba con cavidades de onda de bomba y de onda loca intersecantes;

la Figura 7 es un diagrama esquemático de un generador paramétrico basado en una geometría generadora de bomba en la que la onda loca genera una señal coherente a partir del ruido en un solo paso del material no lineal;

35 la Figura 8 es un diagrama esquemático de un generador paramétrico basado en una geometría generadora de bomba en la cual la onda loca se siembra por inyección; y

la Figura 9 es un diagrama esquemático de un oscilador paramétrico particular para generar radiación de terahercios, dado a modo de ejemplo solamente.

#### Descripción detallada de los dibujos

40 La Figura 5 muestra un oscilador paramétrico de cavidad intersecante. Este tiene un medio no lineal 4 ubicado dentro de una cavidad de onda loca que está definida por dos espejos 6 y 7 y una cavidad de onda de bomba que está definida por espejos 10 y 11. Dentro de la cavidad de onda de bomba hay un medio de ganancia 13 para la onda de la bomba, y medios para controlar la onda de bomba 14, tales como, por ejemplo, un interruptor Q y / o un controlador de frecuencia. Esta es una configuración en la cual la onda de bomba se genera dentro de la cavidad de bomba. Esta configuración se conoce generalmente como una geometría generadora de bomba. El medio de ganancia 13 es excitado por una fuente de bombeo primaria externa 15, tal como diodos láser que incorporan ópticas de acoplamiento adecuadas. El eje óptico aa' de la cavidad de onda loca está dispuesto para intersecar el eje bb' de la cavidad de onda de bomba, de modo que se produce una superposición significativa de las dos ondas en la región cc' dentro del material no lineal 4. Se proporcionan medios para variar el ángulo entre los ejes ópticos aa' y bb'. Por ejemplo, se puede utilizar cualquier disposición mecánica adecuada.

55 Durante el uso, la onda de señal 16 de la Figura 5 sale lateralmente de la región de superposición, para evitar así la absorción. La longitud de onda de la onda de señal 16 puede sintonizarse simplemente variando el ángulo entre los ejes ópticos aa' y bb'. Por ende, el oscilador permite la salida rápida de la onda de señal requerida del material no lineal, mientras que simultáneamente proporciona una sintonización amplia y continua.

60 La Figura 6 muestra otro dispositivo paramétrico que tiene un medio no lineal 4 ubicado dentro de una cavidad de onda loca que está definida por dos espejos 6 y 7 y una cavidad de onda de bomba 17 que está definida por espejos 18 y 19. En este caso, solo el medio no lineal 4 está ubicado en la cavidad de bomba. La cavidad de bomba 17 se mantiene en resonancia con la onda de bomba proporcionada por un láser de bomba externo 20 mediante el uso de la óptica de emparejamiento de modo y aislamiento 21 apropiada y un sistema de servocontrol 22. Esta configuración se conoce generalmente como una geometría de mejora de la bomba. En este caso, el eje óptico aa' de la cavidad de onda loca se cruza con el eje óptico de la cavidad de mejora de bomba 17, de tal manera que se produce una superposición significativa de las dos ondas en la región cc' dentro del material no lineal 4.

Durante el uso, la onda de señal 16 de la Figura 6 sale lateralmente de la región de superposición, para evitar así la absorción. La longitud de onda de la onda de señal puede sintonizarse simplemente variando el ángulo entre los ejes ópticos  $aa'$  y  $bb'$ . Por ende, el oscilador permite la salida rápida de la onda de señal requerida del material no lineal, mientras que simultáneamente proporciona una sintonización amplia y continua.

5 La Figura 7 muestra un generador paramétrico que es similar a la Figura 5. Sin embargo, en este caso, se elimina la cavidad loca y la onda loca se acumula como una señal coherente del ruido en un solo paso del material no lineal, asumiendo una dirección de propagación apropiada para la conversión descendente máxima. La dirección de propagación y, por lo tanto, la sintonización del dispositivo, está determinada por el equilibrio entre las restricciones  
10 impuestas en el proceso de conversión no lineal, como la conservación de energía, coincidencia de fase, ganancia paramétrica, absorción de onda de señal y superposición de las ondas de bomba y loca. Al variar el ángulo entre las direcciones de propagación de las ondas de bomba y loca, este dispositivo puede sintonizarse.

15 La Figura 8 muestra otro generador paramétrico que es similar a la Figura 7. Este es un generador paramétrico sembrado por inyección en el que la cavidad loca es reemplazada por una onda inyectada generada por una sembradora de inyección 23, y dispuesta para propagarse a lo largo del eje previamente asociado con la cavidad loca y con una longitud de onda apropiada a la longitud de onda de la onda loca soportada anteriormente por la cavidad loca. La longitud de onda y la dirección de propagación de la onda loca producida por la generación paramétrica está determinada por la dirección de propagación y la longitud de onda de la onda inyectada. Además, la onda loca crece  
20 por amplificación de la onda inyectada coherente en lugar de por amplificación de ruido como en la Figura 7. Así pues, se reduce la ganancia de un solo paso requerida para que tenga lugar una conversión descendente eficiente. En este caso, el dispositivo es totalmente sintonizable al alterar adecuadamente la dirección de propagación de la onda inyectada a la par con el cambio de su longitud de onda. La inyección de una onda de ancho de línea estrecha puede dar como resultado un estrechamiento de la línea tanto de la onda loca como de señal generadas mediante la  
25 conversión descendente.

La Figura 9 muestra un ejemplo de un oscilador paramétrico con una geometría de cavidad intersecante, específicamente dispuesto con el propósito de generar radiación THz (onda de señal). La cavidad de onda de bomba  
30 está formada por espejos M1 y M2, físicamente separados por 37 cm, e incluye el medio de ganancia láser (LG), óptica de control de polarización (QW, QS y POL) y el cristal no lineal del oscilador paramétrico (NL). El medio de ganancia del láser es un cristal de granate de neodimio-itrinio y aluminio (Nd: YAG) con dimensiones de 4 mm de diámetro x 7 mm de longitud y es excitado por un diodo láser de onda casi continua (QCW-LD) como fuente externa de la bomba. El QCW-LD funciona a una frecuencia de repetición de pulso de hasta 100 Hz con una duración de pulso de hasta 500 ms y una potencia máxima superior a 100 W (50 mJ por pulso).

35 La salida del QCW-LD se entrega por fibra y se acopla al medio de ganancia del láser a través de un par de lentes esféricas (AL). Una primera lente esférica, con apertura numérica consistente con la salida de fibra (NA 0,22), sirve para colimar la salida de fibra mientras que la segunda forma una imagen de la abertura de salida de la fibra (cerca de una relación de objeto-imagen 1:1) en el cristal Nd: YAG. El estado de polarización de la onda de bomba resonante se determina mediante la inserción en la cavidad de onda de bomba de un polarizador de cubo con espacio de aire (POL). Para lograr la potencia máxima deseada en la onda de bomba, el láser de bomba sufre conmutación Q mediante la inserción de una lámina de cuarto de onda (QW) y un interruptor Q electroóptico (QS) basado en dihidrogenofosfato de potasio deuterado (KD\*P). La acción de estos elementos en asociación con el polarizador sigue un modo de operación estándar. En el sistema experimental, la duración del pulso de la bomba, en ausencia de cualquier proceso  
40 de generación paramétrica, normalmente de 30 ns se alcanza y con la energía de excitación QCW-LD máxima, la energía del pulso de la bomba es superior a 5 mJ.

Los espejos que forman la cavidad láser de la bomba comprenden M1, que es un recubrimiento de alto reflector (> 99,8 % R @ 1064 nm) aplicado directamente a la cara posterior del cristal Nd: YAG (este es un recubrimiento dielectrico que también transmite la luz de excitación QCW-LD de 808 nm), y M2, que es un recubrimiento reflector parcial (R = 90 % @ 1064 nm) aplicado a un sustrato de espejo plano. Este último espejo no tiene el propósito de acoplamiento de salida, ya que la intención es mantener la mayor potencia de intracavidad posible consistente con la evitación del daño óptico. Mientras que típicamente las transmisiones del orden del 5-10 % se utilizan en la práctica, lo que resulta en potencias de intracavidad del orden de 10 a 20 veces mayor que la potencia de salida que se puede obtener con un acoplamiento de salida optimizado, son posibles mejoras mayores, pero la limitación a los valores anteriores es consistente con la evitación de daños ópticos y el requisito de monitorear confiablemente la potencia intracavitaria. La calidad modal (espacial) de la onda de bomba en este resonador plano-plano se determina mediante una combinación de lentes térmicas, ganancia de guía y apertura suave por la extensión del volumen excitado en el medio de ganancia láser, cuyo efecto combinado da como resultado un modo de bomba limitada por difracción cercana. Todas las demás superficies ópticas en la cavidad de onda de bomba están recubiertas con antirreflejos a una longitud de onda de la  
50 onda de bomba de 1064 nm.

El cristal no lineal NL es niobato de litio dopado con óxido de magnesio ( $MgO: LiNbO_3$ ) y tiene una abertura en el plano xz de dimensiones 5 mm x 5 mm, como se ve por las ondas de bomba y loca, y longitud a lo largo del eje x de 50 mm.  
65 El cristal está orientado de tal manera que los vectores eléctricos de las ondas de bomba, loca y de señal se encuentran a lo largo del eje z, y la propagación de la onda de bomba se realiza a lo largo del eje x. La cavidad del oscilador

paramétrico está formada por los espejos planos M3 y M4, que son respectivamente un reflector alto y un reflector parcial ( $R \sim 98\%$ ) en la longitud de onda loca. Es conveniente que, dado que la longitud de onda loca está cerca de la bomba, estos pueden ser espejos de cavidad láser estándar Nd.

- 5 Los espejos M3 y M4 están montados en soportes de espejo ajustables para facilitar la alineación, pero notablemente estos soportes se encuentran en los extremos de una barra giratoria común centrada sobre el cristal no lineal para permitir un ajuste angular fácil del eje de la cavidad loca en relación con la onda de bomba y, por lo tanto, la sintonización de las longitudes de onda de señal / loca a través de la geometría de coincidencia de fase no colineal. La longitud física de la cavidad loca es de 13 cm y forma una cavidad intersecante con el resonador de onda de bomba, donde el punto central de intersección está dentro del cristal no lineal. Idealmente, la cavidad loca se acortaría. Sin embargo, está limitada por la necesidad de que las ondas de bomba y loca estén físicamente separadas para que los espejos de la cavidad loca no obstruyan a la onda de bomba. La geometría de coincidencia de fase altamente no colineal, en lo que se refiere a la onda de señal generada (THz), da como resultado que la onda THz salga del cristal no lineal a través de una cara lateral. Las caras laterales de 5 mm x 50 mm del cristal no lineal que tienen su normal perpendicular al eje z cristalográfico se fabrican con un buen pulido óptico. Debido al alto índice de refracción de MgO:LiNbO<sub>3</sub> a longitudes de onda THz ( $\sim 5,2$ ), el ángulo total de reflexión interna para una interfaz de cristal-aire es de alrededor de 11 grados, medido de la normal a la interfaz.

- 20 En esta geometría de coincidencia de fase no colineal de la Figura 9, la onda THz incide en un ángulo de alrededor de 30 grados y, por lo tanto, se reflejaría totalmente internamente y no se acoplaría a la salida. Para evitar este problema, se utiliza un acoplador de salida prismático. En este caso, los prismas fabricados a partir de silicio (índice de refracción  $\sim 3,2$ ) se colocan contra la cara pulida del cristal de niobato de litio, lo que aumenta el ángulo de reflexión interna total en la interfaz ahora de cristal-silicio a alrededor de 38 grados y, por lo tanto, permite el acoplamiento de salida. La forma prismática del silicio permite una incidencia casi normal de la onda THz en la superficie externa de los prismas. La reflexión de Fresnel desde esta superficie sigue siendo significativa en este momento ( $\sim 27\%$ ), pero podría reducirse en el futuro mediante la aplicación de una capa de coincidencia de índice.

- 30 El umbral de oscilación del dispositivo anterior correspondía a una energía de pulso de bomba del orden de 0,7 J a 1064 nm, cuando la intensidad intracavitaria máxima asociada de la radiación de la bomba fue de  $12 \text{ MWcm}^{-2}$ , con una duración de pulso de bomba de 45 ns (FWHM). Cuando la energía de pulso de bomba se incrementó a 1,3 mJ (dos veces el umbral), correspondiente a una intensidad máxima intracavitaria para el pulso de la bomba de  $25 \text{ MWcm}^{-2}$ , el agotamiento del pulso de la bomba fue cercano al 50 %, correspondiente a alrededor de 0,6 mJ de la energía de pulso de bomba con conversión descendente a la energía de onda de señal / loca. En estas condiciones, se obtuvo una salida de THz con una energía de pulso del orden de 5 nJ y una duración de pulso de unos pocos nanosegundos.

- 35 Al alterar el ángulo entre la onda de bomba y la onda loca resonada en el rango de 1 a 3°, girando la cavidad loca como se describe arriba, la frecuencia del pulso de salida se sintonizó de 1,2 a 3,05 THz. El dispositivo fue operado a una frecuencia de repetición de 15 Hz. El funcionamiento al doble del umbral de oscilación fue suficiente para garantizar que el proceso de conversión descendente no lineal en sí mismo vertiera efectivamente en la cavidad toda la energía circulante dentro del campo de la bomba en un punto en el tiempo justo en el máximo del impulso Q-conmutado, que en sí correspondía a la extracción eficiente de la energía almacenada en la inversión de la población en el medio de ganancia Nd en el campo de la bomba intracavitaria circulante. Por ende, el sistema de la Figura 9 proporcionó un medio relativamente simple y robusto para generar radiación de terahercios.

- 45 Una persona experta apreciará que son posibles variaciones de las disposiciones divulgadas sin apartarse de la invención. Por ejemplo, aunque la Figura 7 y la Figura 8 muestran una cavidad de bomba basada en una geometría generadora de bomba, se apreciará que una geometría de mejora de la bomba es igualmente aplicable. Por consiguiente, la descripción anterior de una realización específica se realiza solo a modo de ejemplo y no con fines de limitación. Será claro para la persona experta que se pueden hacer modificaciones menores sin cambios significativos en la operación descrita.

**REIVINDICACIONES**

- 5 1. Un dispositivo paramétrico que tiene un material no lineal (4) para generar ondas locas y de señal (16) en respuesta a una onda de bomba (14), siendo las ondas de bomba, loca y de señal no colineales, y la onda de señal está sujeta a absorción por el material no lineal y sale lateralmente del material no lineal, teniendo el dispositivo una cavidad (10,11) que resuena en la longitud de onda de la bomba y que contiene el material no lineal (4), y medios para variar el ángulo entre las direcciones de propagación de la bomba y las ondas locas para sintonizar la longitud de onda de la señal.
- 10 2. Un dispositivo según la reivindicación 1, en donde la cavidad (10,11) resonante en la longitud de onda de la bomba contiene el medio de ganancia (13) del láser de bomba.
- 15 3. Un dispositivo según la reivindicación 1, en donde la cavidad (10,11) resonante en la longitud de onda de la bomba es tal que mejora de manera resonante una onda de bomba generada por un láser de bomba externo (15).
4. Un dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende una cavidad que resuena en la longitud de onda loca (6,7).
- 20 5. Un dispositivo según la reivindicación 1, en donde la dirección de propagación y la longitud de onda de la onda loca se determina por inyección en el material no lineal de una onda de siembra desde una fuente externa (23).
6. Un dispositivo según la reivindicación 1 dispuesto para generar radiación de terahercios,

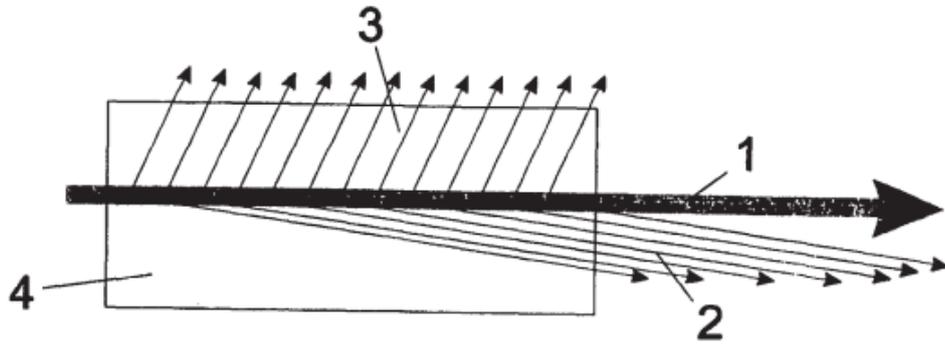


Figura 1

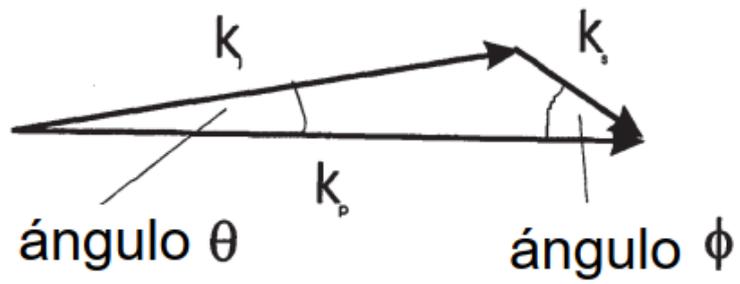


Figura 2

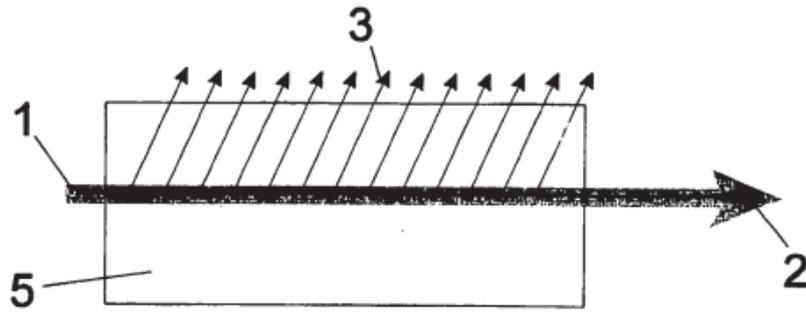


Figura 3

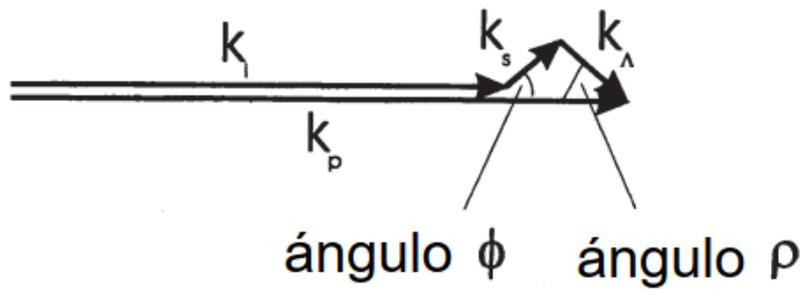


Figura 4

Figura 5

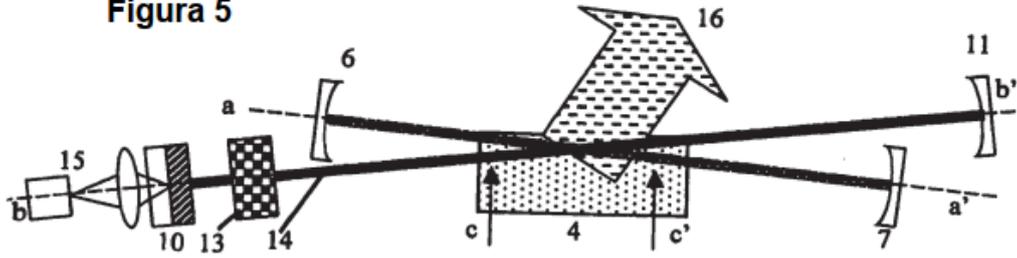


Figura 6

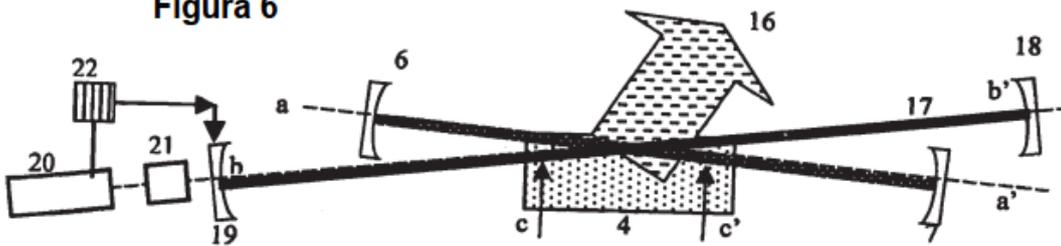


Figura 7

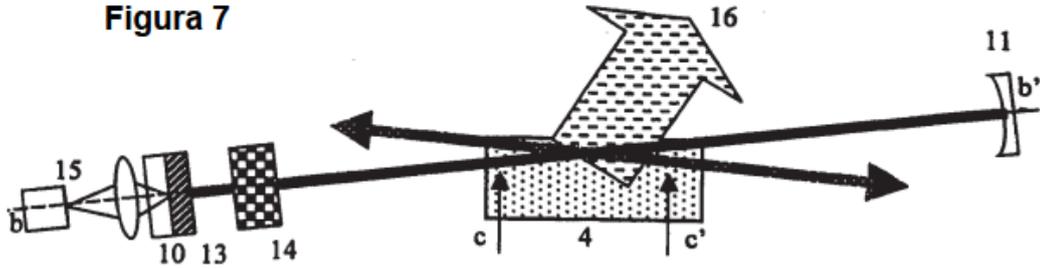
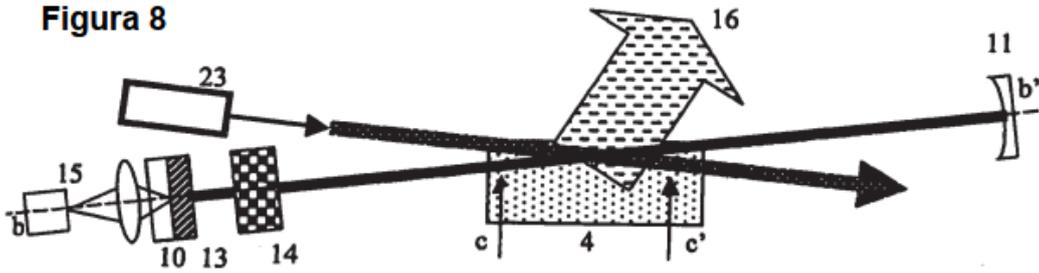


Figura 8



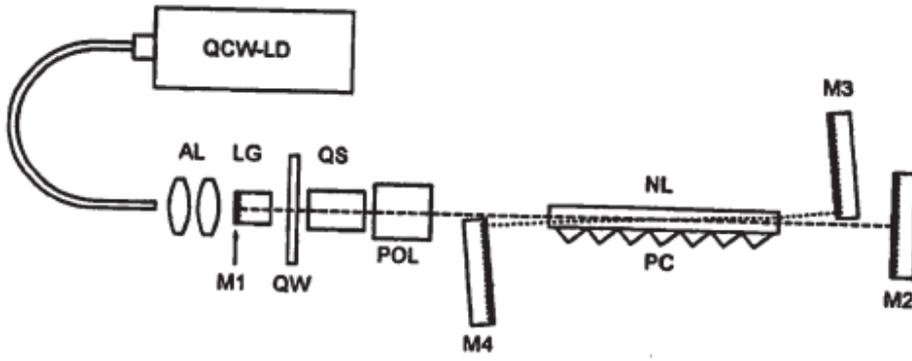


Figura 9