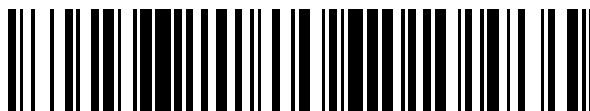


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 938 569**

51 Int. Cl.:

**G02F 1/35** (2006.01)

**G02F 1/37** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.02.2015** **E 20202563 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **21.12.2022** **EP 3783428**

54 Título: **Utilización de un cristal óptico no lineal para generar pulsos de láser ultravioleta de femtosegundo**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**12.04.2023**

73 Titular/es:

**ALCON INC. (100.0%)**  
**Rue Louis-d'Affry 6**  
**1701 Fribourg, CH**

72 Inventor/es:

**VOGLER, KLAUS;**  
**KLENKE, JOERG y**  
**LOERNER, JOHANNES**

74 Agente/Representante:

**LEHMANN NOVO, María Isabel**

ES 2 938 569 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

Utilización de un cristal óptico no lineal para generar pulsos de láser ultravioleta de femtosegundo

### Antecedentes

#### Campo de la descripción

- 5 La presente exposición se refiere a la generación de un haz láser, y más específicamente, a una utilización de un cristal óptico no lineal para generar pulsos de láser ultravioleta de femtosegundo.

#### Descripción de la técnica relacionada

- 10 En los últimos años, se han desarrollado láseres de femtosegundo para diversas aplicaciones en la cirugía ocular, entre otros usos. Debido a la muy corta duración del pulso en el rango del femtosegundo, los láseres de femtosegundo son capaces de desarrollar una alta intensidad de energía en un material objetivo, tal como el tejido ocular, lo que conduce a procesos de fotodisrupción no lineales que dan como resultado una división del tejido y evita efectos térmicos negativos.

Las longitudes de onda habituales para los láseres de femtosegundo comerciales están en el rango de infrarrojo cercano del espectro, teniendo longitudes de onda de aproximadamente 1000-1100 nanómetros (nm).

- 15 El artículo científico "Numerical study and optimization of third harmonics generation in two-sectioned periodically poled LiTaO<sub>3</sub>" de Louchev *et al.*, (PROCEEDINGS OF SPIE; vol. 7345, 28 de mayo de 2009) divulga la utilización de un PPQPMC con dos secciones de tantalito de litio dopado con Mag para la generación de terceros armónicos (THG) a partir de una fuente de pulsos NIR que emite pulsos láser en el rango del nanosegundo. Los artículos "Highly efficient second, third and fourth harmonic generation from a two-branch femtosecond erbium fiber source" de Konstantinos Moutzouris *et al.*, "Cascaded third harmonic generation of ultrashort optical pulses in two-dimensional quasi-phase-matching gratings" de Nobuhide Fujioka *et al.*, y "355nm generation by Fan-out PP-LBGO device" de Hiohashi Junji *et al.*, divulgan cristales ópticos no lineales similares.

### COMPENDIO

- 25 En un aspecto, se ha proporcionado una utilización expuesta de un cristal óptico no lineal para generar pulsos láser ultravioleta de femtosegundo con las características de la reivindicación 1. Además pueden derivarse características opcionales a partir de las reivindicaciones dependientes. La utilización de un cristal óptico no lineal para generar pulsos láser ultravioleta de femtosegundo incluye dirigir, hacia un cristal óptico no lineal, un primer pulso láser que tiene una longitud de onda fundamental en una parte de infrarrojo cercano del espectro electromagnético, teniendo el primer pulso láser una duración de pulso de menos de 1000 femtosegundos. La utilización incluye convertir, en una primera parte del cristal óptico no lineal, al menos algunos fotones del primer pulso láser a una segunda longitud de onda armónica de la longitud de onda fundamental, para generar un segundo pulso láser dentro del cristal óptico no lineal. La utilización también incluye convertir, en una segunda parte del cristal óptico no lineal, al menos algunos fotones del primer pulso láser y el segundo pulso láser a una tercera longitud de onda armónica de la longitud de onda fundamental, para generar un tercer pulso láser dentro del cristal óptico no lineal. La utilización incluye además producir el tercer pulso láser a partir del cristal óptico no lineal, de modo que el tercer pulso láser tenga la duración del pulso.

- 40 En las realizaciones expuestas, el método incluye producir el primer pulso láser y el segundo pulso láser a partir del cristal óptico no lineal. En las realizaciones expuestas de la utilización, el cristal óptico no lineal incluye un cristal de cuasi ajuste de fase periódicamente polarizado. En un ejemplo que forma la técnica anterior, la primera parte del cristal óptico no lineal y la segunda parte del cristal óptico no lineal se pueden formar como un material unitario individual. En las realizaciones expuestas de la utilización, la primera parte del cristal óptico no lineal incluye un cristal de tantalato de litio estequiométrico dopado con óxido de magnesio periódicamente polarizado. En las realizaciones expuestas de la utilización, la segunda parte del cristal óptico no lineal incluye un cristal de óxido de germanio, bario y lantano periódicamente polarizado.

- 45 En cualquiera de las realizaciones expuestas, el funcionamiento de la utilización de dirigir el primer pulso láser, puede incluir además el enfoque del primer pulso láser en el cristal óptico no lineal. En cualquiera de las realizaciones expuestas, la utilización puede incluir un filtrado espectral, en la salida del cristal óptico no lineal, el tercer pulso láser a partir del primer pulso láser y del segundo pulso láser. En cualquiera de las realizaciones expuestas de la utilización, el cristal óptico no lineal puede incluir capas periódicamente polarizadas que se sintonizan de acuerdo con la longitud de onda fundamental. En las realizaciones expuestas de la utilización, un primer patrón de intensidad de la sección transversal del primer pulso láser se ajusta con un segundo patrón de intensidad de la sección transversal del tercer pulso láser.

- 55 En otro aspecto que forma la técnica anterior, una fuente láser ultravioleta de femtosegundo expuesta puede incluir una fuente láser que incluya un láser pulsado de femtosegundo de infrarrojo cercano, teniendo la fuente láser una duración de pulso de menos de 1000 femtosegundos y teniendo una longitud de onda fundamental. La fuente láser

ultravioleta de femtosegundo puede incluir un cristal óptico no lineal que tiene una primera parte y una segunda parte orientadas sucesivamente con respecto a una orientación de fotones incidentes desde la fuente láser. En la fuente láser ultravioleta de femtosegundo, la primera parte del cristal óptico no lineal puede recibir los primeros fotones desde la fuente láser y puede convertir al menos algunos de los primeros fotones a segundos fotones, que tienen una segunda longitud de onda armónica de la longitud de onda fundamental para generar un segundo pulso láser. En la fuente láser ultravioleta de femtosegundo, la segunda parte del cristal óptico no lineal puede recibir al menos algunos de los primeros fotones y los segundos fotones, y puede convertir al menos algunos de los primeros fotones y los segundos fotones a terceros fotones, que tienen una tercera longitud de onda armónica de la longitud de onda fundamental para generar un tercer pulso láser que tiene la duración del pulso.

En cualquiera de los ejemplos de la técnica anterior expuestos de la fuente láser ultravioleta de femtosegundo, la segunda parte puede producir el primer pulso láser, el segundo pulso láser y el tercer pulso láser a partir del cristal óptico no lineal. En la fuente láser ultravioleta de femtosegundo, el cristal óptico no lineal puede incluir un cristal de cuasi ajuste de fase periódicamente polarizado. En la fuente láser ultravioleta de femtosegundo, la primera parte del cristal óptico no lineal y la segunda parte del cristal óptico no lineal se pueden formar como un material unitario individual. En la fuente láser ultravioleta de femtosegundo, la primera parte del cristal óptico no lineal puede incluir un cristal de tantalato de litio estequiométrico dopado con óxido de magnesio periódicamente polarizado. En la fuente láser ultravioleta de femtosegundo, la segunda parte del cristal óptico no lineal puede incluir un cristal de óxido de germanio, bario y lantano periódicamente polarizado.

En cualquiera de los ejemplos de la técnica anterior expuestos, la fuente láser ultravioleta de femtosegundo puede incluir un elemento de enfoque para enfocar el primer pulso láser en el cristal óptico no lineal. En cualquiera de los ejemplos de la técnica anterior expuestos, la fuente láser ultravioleta de femtosegundo puede incluir un filtro óptico para separar espectralmente, en la salida del cristal óptico no lineal, el tercer pulso láser del primer pulso láser y el segundo pulso láser. En cualquiera de los ejemplos expuestos de la fuente láser ultravioleta de femtosegundo, el cristal óptico no lineal puede incluir capas periódicamente polarizadas que se sintonizan de acuerdo con la longitud de onda fundamental. En cualquiera de los ejemplos expuestos de la fuente láser ultravioleta de femtosegundo, un primer patrón de intensidad de la sección transversal del primer pulso láser se puede ajustar a un segundo patrón de intensidad de la sección transversal del tercer pulso láser.

#### **BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS**

Para una comprensión más completa de la presente invención y de sus características y ventajas, ahora se hace referencia a la siguiente descripción, considerada junto con los dibujos anexos, en los cuales:

la figura 1 es un diagrama de bloques de elementos seleccionados de una realización de un láser ultravioleta de femtosegundo; y

la figura 2 es un diagrama de flujo de elementos seleccionados de un método para generar un pulso de láser ultravioleta de femtosegundo.

#### **DESCRIPCIÓN DE LA REALIZACIÓN O REALIZACIONES PARTICULARES**

En la siguiente descripción, se explican detalles a modo de ejemplo para facilitar el análisis de la materia descrita. No obstante, para un experto en la técnica debería ser evidente que las realizaciones descritas son ejemplares y no están incluidas todas las posibles realizaciones.

Tal como se utiliza en la presente, una forma unida con guión de un número de referencia se refiere a un caso específico de un elemento y la forma sin guión del número de referencia se refiere al elemento colectivo. Por tanto, por ejemplo, el dispositivo '12-1' se refiere a un caso de una clase de dispositivo, que puede mencionarse colectivamente como dispositivos '12' y uno cualquiera de los cuales se puede mencionar de manera genérica como un dispositivo '12'.

Tal como se ha mencionado, los láseres de femtosegundo de infrarrojo cercano se han desarrollado comercialmente para diversas aplicaciones, tal como la cirugía ocular. No obstante, en diferentes aplicaciones, pueden ser deseables las fuentes de láser de femtosegundo que tienen una frecuencia más alta (o longitudes de onda más cortas). Por ejemplo, los láseres ultravioleta de femtosegundo se pueden desear en oftalmología para cortar tejido de manera precisa, reducir la energía del pulso, disminuir un volumen de destrucción de una incisión láser y evitar una penetración no deseada de la radiación en tejidos más profundos. Asimismo, los láseres ultravioleta de femtosegundo pueden proporcionar beneficios únicos en aplicaciones de procesamiento de materiales, donde se desee una eliminación de material precisa o selectiva en plásticos, cerámicas y metales.

Tal como se describirá con mayor detalle, la generación estable, robusta y ópticamente eficiente del tercer armónico de pulsos láser fs se expone utilizando cristales de cuasi ajuste de fase periódicamente polarizados (PPQPMC, por sus siglas en inglés) que tienen números diferentes de capas cristalinas periódicas o "polarizadas" que facilitan una longitud de conversión larga sin conversión inversa y sin una orientación especial de ajuste de fase del PPQPMC que pueda ser difícil de lograr y mantener.

Al contrario que la PPQPMC expuesta en la presente, la generación de pulsos láser ultravioleta se ha realizado habitualmente utilizando un proceso óptico de 2 pasos con un láser de entrada de infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés) que opera a una longitud de onda de, o cercana a, 1000 nm, a la que se hace referencia en la presente como una frecuencia fundamental  $\omega_1$ . En un primer paso, denominado como generación del segundo armónico (SHG, por sus siglas en inglés), se puede lograr una frecuencia que dobla la fuente láser NIR para generar  $\omega_2$ , donde  $\omega_2 = 2\omega_1$ , utilizando un primer cristal que se corta y orienta de acuerdo con un primer ángulo de ajuste de fase para la SHG. En un segundo paso, denominado como generación del tercer armónico (THG, por sus siglas en inglés), que utiliza una parte restante de la fuente láser NIR y la SHG generada, se puede obtener una suma de frecuencias de la NIR y la SHG para generar  $\omega_3$ , donde  $\omega_3 = 3\omega_1 = \omega_1 + \omega_2$ . En consecuencia, también se puede hacer referencia al segundo paso como una suma de generación de frecuencias (SFG, por sus siglas en inglés). El segundo paso puede involucrar utilizar un segundo cristal que se corta y orienta de acuerdo con un segundo ángulo de ajuste de fase para la THG, que es diferente del primer ángulo de ajuste de fase. La generación, o conversión, de frecuencias de láser para la SHG y THG se realiza habitualmente utilizando materiales ópticos no lineales separados sin tratar, tales como el borato de bario (BBO, por sus siglas en inglés) y el triborato de litio (LBO, por sus siglas en inglés), que se utilizan en la forma cristalina sin tratar. La desviación natural del haz y el retraso del pulso entre  $\omega_1$  y  $\omega_2$  puede dar como resultado una dificultad significativa para lograr una mayor eficiencia de conversión a la hora de generar  $\omega_3$  utilizando el método de cristales duales separados. Muchos instrumentos habituales para la THG emplean a menudo configuraciones ópticas con una complejidad añadida, tales como una nueva colimación, un nuevo enfoque y una línea de retraso.

Debido al proceso de 2 pasos, se utilizan habitualmente 2 cristales diferentes sin tratar para la SHG y THG, lo cual puede dar como resultado un cierto costo y esfuerzo para implementarlo con éxito. Por ejemplo, una THG eficiente puede involucrar orientar los haces láser incidentes a unas orientaciones particulares de los ejes cristalográficos de los cristales, lo que se denomina como una dirección de ajuste de fase. Únicamente en la dirección de ajuste de fase, la velocidad del grupo de las frecuencias generadas ( $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ) será la misma que la de la frecuencia de THG ( $\omega_3$ ) lo que da como resultado un impulso deseado y la conservación de la energía. Debido a que los 2 cristales se cortarán y orientarán independientemente entre sí, su sensibilidad de adaptación para la alineación en la dirección de ajuste de fase puede ser bastante alta, lo que puede dar como resultado un esfuerzo de alineación relativamente alto y períodos cortos de estabilidad operativa. Esta sensibilidad de alineación se transmite como una sensibilidad alta en la dirección del objetivo de la fuente de la frecuencia fundamental. Cuando el proceso de 2 pasos se utiliza con haces láser pulsados se pueden aplicar restricciones adicionales, ya que la duración de los pulsos se acorta hasta el rango de los fs, al menos en parte debido al gran ancho de banda del pulso láser y a la superposición temporal y espacial del pulso extremadamente corto que se propaga a través del cristal. En muchas disposiciones ópticas, el cristal para la THG no tiene suficiente ancho de banda de conversión y se utilizan líneas de retraso adicionales del trayecto óptico entre los trayectos ópticos para los pulsos de frecuencias diferentes, lo que da como resultado un esfuerzo de adaptación aún mayor y una menor estabilidad, debido a la exactitud y precisión muy altas de los trayectos ópticos que conllevan los pulsos de fs. Añadiendo aún más al costo y esfuerzo de la THG con pulsos láser cortos en sistemas habituales de 2 cristales sin tratar, los cristales sin tratar utilizados para la THG deberían ser tan delgados como fuese posible para minimizar la dispersión del pulso debido a un retraso de la velocidad del grupo (GVD, por sus siglas en inglés), que puede conducir posteriormente a la utilización de espejos dispersivos compensados para evitar desplazamientos de fase que dependan de la frecuencia. Asimismo, la utilización de cristales muy delgados a lo largo del eje óptico puede reducir la eficiencia de conversión en el cristal, lo que hace que sean aún más difíciles de alcanzar energías del pulso altas.

Haciendo referencia ahora a los dibujos, la figura 1 es un diagrama de bloques que muestra los elementos seleccionados de una realización de un láser ultravioleta de femtosegundo 100. El láser ultravioleta de femtosegundo 100 no se dibuja a escala, sino que es una representación esquemática. En diversas realizaciones, el láser ultravioleta de femtosegundo 100 se puede implementar con menos o más componentes que los ilustrados en la realización ejemplar de la figura 1, que se muestra con fines descriptivos. Cabe destacar que, aunque el láser ultravioleta de femtosegundo 100 se describe en la presente con respecto a ciertas longitudes de onda en el espectro electromagnético, el láser ultravioleta de femtosegundo 100 se puede sintonizar de modo que opere con longitudes de onda diferentes en realizaciones diferentes. Aunque el haz NIR 130, el haz visible 132 y el haz UV 134 se muestran de una manera adyacente en la figura 1 para una mayor claridad en la descripción, se sobreentenderá que los tres haces están superpuestos y viajan de manera confocal.

Tal como se muestra, el láser ultravioleta de femtosegundo 100 incluye una fuente láser de fs NIR 102, que puede ser cualquiera de diversas fuentes de láser de fs NIR que opere a ciertas longitudes de onda NIR, tales como a 1053 nm, 1064 nm, etc. Asimismo, la fuente láser de fs NIR 102 puede ser adaptable a diferentes intensidades de potencia, duraciones de los pulsos, tasas de repetición, etc., según se desee para aplicaciones particulares, tales como en oftalmología, por ejemplo. La fuente láser de fs NIR 102 produce un haz NIR 130 a una longitud de onda fundamental que se corresponde con la frecuencia  $\omega_1$ , tal como se ha descrito anteriormente. Debido a que el haz NIR 130 es en general un haz pulsado, el haz NIR 130, o al menos algunos de los fotones que comprende el haz NIR 130, se puede denominar como un primer pulso láser. En el láser ultravioleta de femtosegundo 100, el haz NIR 130 está dirigido al cristal óptico no lineal 104. Tal como se muestra, antes de incidir sobre el cristal óptico no lineal 104, se utiliza un elemento de enfoque 106 para enfocar el haz NIR 130, lo que se puede utilizar para mejorar la generación del haz UV 134 en la segunda parte 104-2 del cristal no lineal 104. En ciertas realizaciones, el elemento

de enfoque 106 se puede omitir o sustituir o duplicar según se desee para una aplicación particular de láser ultravioleta de femtosegundo 100. Cabe destacar que el elemento de enfoque 106 puede representar un único componente adaptable mecánicamente del láser ultravioleta de femtosegundo 100, de modo que se puedan implementar otras partes restantes del láser ultravioleta de femtosegundo 100 como un dispositivo en estado sólido sin partes móviles.

En la figura 1, el cristal óptico no lineal 104 comprende una primera parte 104-1 y una segunda parte 104-2, que se disponen de manera sucesiva con respecto al haz NIR 130 que procede de la fuente láser de fs NIR 102. En la primera parte 104-1 del cristal óptico no lineal 104, al menos algunos de los fotones del haz NIR 130 se convierten a una segunda longitud de onda armónica que se corresponde con la frecuencia  $\omega_2$ , tal como se describe anteriormente, por medio de un proceso no lineal de generación del segundo armónico (SHG) que da como resultado un haz visible 132. Debido a que la primera parte 104-1 puede tener una longitud de interacción virtualmente larga como resultado de las capas de polarización periódica, el haz visible 132 puede comenzar en alguna ubicación dentro de la primera parte 104-1 y se emite desde la primera parte 104-1 junto con los fotones restantes del haz NIR 130 que no se convirtieron. Debido a que el haz NIR 130 es en general un haz pulsado, el haz visible 132, o al menos algunos de los fotones que comprende el haz visible 132, se puede denominar como un segundo pulso láser.

En el láser ultravioleta de femtosegundo 100, el cristal ultravioleta no lineal 104 puede comprender un cristal de cuasi ajuste de fase periódicamente polarizado (PPQPMC), para el cual se ilustran esquemáticamente, con fines descriptivos, las capas periódicamente polarizadas en la sección transversal de la figura 1, y estas no se dibujan a escala. La polarización periódica se puede formar como capas de material que tienen una periodicidad especificada que se corresponde con una sintonización particular de la longitud de onda. Las capas de material se pueden formar mediante la transferencia de un patrón fotolitográfico de un plano a cristalográfico de acuerdo con la periodicidad especificada. La periodicidad puede estar en el rango de aproximadamente 1 a 10 micras, con un rango global de grosor de la primera parte 104-1 o la segunda parte 104-1 de aproximadamente 100 a 1000 micras. Una sección transversal global del cristal óptico no lineal 104 puede estar formada por un área de aproximadamente 1 a 100 milímetros cuadrados. En algunos ejemplos que representan la técnica anterior, la primera parte 104-1 y la segunda parte 104-1 se forman como un material unitario individual que comprende el cristal óptico no lineal 104. En algunas realizaciones dadas, la primera parte 104-1 está compuesta de un cristal de tantalato de litio estequiométrico dopado con óxido de magnesio (MgSLT, por sus siglas en inglés) periódicamente polarizado, mientras que la segunda parte 104-2 está compuesta de un cristal de óxido de germanio, bario y lantano (LBGO, por sus siglas en inglés) periódicamente polarizado.

Debido a las propiedades ópticas del cristal óptico no lineal 104, un primer patrón de intensidad de la sección transversal del primer pulso láser se ajusta con un segundo patrón de intensidad de la sección transversal del segundo pulso láser. Dicho de otro modo, la primera parte 104-1 mantiene un patrón de intensidad de la sección transversal del haz NIR 130, al menos en su forma sino en tamaño global, cuando genera el haz visible 132 mediante SHG. Asimismo, una primera coherencia temporal del primer pulso láser puede estar ajustada sustancialmente con una segunda coherencia temporal del segundo pulso láser. Dicho de otro modo, el haz NIR 130 y el haz visible 132 pueden exhibir aproximadamente la misma duración de pulso, de modo que cuando el haz NIR 130 se presente como un pulso de femtosegundo, el haz visible 132 se presente como un pulso de femtosegundo. Asimismo, debido a que el cristal óptico no lineal 104 es relativamente independiente de un ángulo exacto de incidencia para la SHG del haz NIR 130, puede no verse afectada sustancialmente una eficiencia de la conversión para la SHG por los pequeños cambios en el ángulo incidente del haz NIR 130 y, en consecuencia, una dirección incidente de fotones en un haz incidente que se origina desde la fuente láser de fs NIR 102. Por esta razón, el láser ultravioleta de femtosegundo 100 puede ser relativamente robusto y estable, por ejemplo, frente a la temperatura o vibración, y se puede fabricar utilizando procesos ópticos estándar de modo que sea adecuado un ajuste inicial de fábrica para una vida útil operativa deseada del láser ultravioleta de femtosegundo 100. Otra ventaja importante del láser ultravioleta de femtosegundo 100 puede resultar debido a que el PPQPMC utilizado para el cristal óptico no lineal 104 no produce desviación espacial y exhibe una desviación temporal relativamente pequeña debido a la longitud relativamente corta utilizada.

En la segunda parte 104-2 del cristal óptico no lineal 104, al menos algunos de los fotones del haz NIR 130, que quedan después de la SHG, y al menos algunos de los fotones del haz visible 132 se convierten a una tercera longitud de onda armónica que se corresponde con la frecuencia  $\omega_3$ , tal como se describe anteriormente, por medio de un proceso no lineal de generación del tercer armónico (THG) que da como resultado un haz UV 134. El haz UV 134 puede comenzar en alguna ubicación dentro de la segunda parte 104-2 y se emite desde la segunda parte 104-2 junto con los fotones restantes del haz NIR 130 y el haz visible 132 que no se convirtieron mediante la SHG o la THG respectivamente. Debido a que el haz NIR 130 es en general un haz pulsado, el haz UV 134, o los fotones que comprende el haz UV 134, se puede denominar como un tercer pulso láser.

Debido a las propiedades ópticas del cristal óptico no lineal 104, el segundo patrón de intensidad de la sección transversal del segundo pulso láser se ajusta con un tercer patrón de intensidad de la sección transversal del tercer pulso láser. Dicho de otro modo, la segunda parte 104-2 mantiene un patrón de intensidad de la sección transversal del haz NIR 130, al menos en su forma si no en tamaño global, cuando genera el haz UV 134 mediante THG. Asimismo, la segunda coherencia temporal del segundo pulso láser (SHG) puede ajustarse sustancialmente con una

tercera coherencia temporal del tercer pulso láser (THG). En diversas realizaciones, la primera coherencia temporal del primer pulso láser (NIR) puede ajustarse sustancialmente con la segunda coherencia temporal del segundo pulso láser (SHG). Dicho de otro modo, el haz NIR 130 y el haz UV 134 pueden exhibir la misma duración de pulso, de modo que cuando el haz NIR 130 se presente como un pulso de femtosegundo, el haz UV 134 se presente como pulso de femtosegundo. Debido a que la primera parte 104-1 y la segunda parte 104-2 se fijan en general de modo que estén cerca una de otra, la segunda parte 104-2 recibe en general el haz NIR 130 y el haz visible 132 con el mismo ángulo de incidencia que la primera parte 104-1.

Asimismo, el láser ultravioleta de femtosegundo 100 se muestra con un divisor de haz óptico 108 que separa el haz UV 134 del haz NIR 130 y del haz visible 132. El divisor de haz óptico 108 puede ser un separador de armónicos, tal como un espejo dicróico, cuando el haz NIR 130 y el haz visible 132 se utilizan para un propósito deseado, tal como la monitorización de la potencia. En otras realizaciones, el divisor de haz óptico 108 puede ser un filtro de paso de banda que se sintoniza para que pase de manera discriminada el haz UV 134.

En consecuencia, desde la segunda parte 104-2, el primer pulso láser, el segundo pulso láser y el tercer pulso láser se emiten sustancialmente con coherencia temporal y espacial. Debido a los procesos de SHG y THG dentro del cristal óptico no lineal 104, tal como se describe anteriormente, los haces emitidos desde el cristal óptico no lineal 104 tienen intensidades de potencia variables. Específicamente, el haz NIR 130 tiene una menor intensidad de potencia saliendo de la segunda parte 104-2, en comparación con una intensidad incidente del haz NIR en la primera parte 104-2. Habitualmente, el haz UV 134 tiene una menor intensidad de potencia saliendo de la segunda parte 104-2 que el haz visible 132. No obstante, debido a que el cristal óptico no lineal 104 puede tener una mayor eficiencia de conversión a una mayor intensidad de potencia, el haz UV 134 se puede generar mediante un láser ultravioleta de femtosegundo 100 a niveles de intensidad de potencia absoluta relativamente altos, también debido a que el cristal óptico no lineal 104 es adecuado para recibir intensidades de potencia muy altas del haz NIR 130. Por ejemplo, en ciertas realizaciones, una intensidad de potencia del haz UV 134 puede ser aproximadamente de un 10% a un 30% (tasa de conversión de la THG) de una intensidad de potencia del haz NIR 130, utilizando el láser ultravioleta de femtosegundo 100. En realizaciones particulares, el láser ultravioleta de femtosegundo 100 puede ser adecuado para intensidades de potencia de 1 teravatio por centímetro cuadrado o mayores, y puede operar de una manera estable durante al menos 100 horas para generar el haz UV 134. En consecuencia, el láser ultravioleta de femtosegundo 100 puede superar diversas limitaciones y restricciones de los métodos ya conocidos de generación de un láser UV de fs.

Cabe destacar que, en diversas realizaciones o disposiciones del láser ultravioleta de femtosegundo 100, se pueden utilizar diferentes implementaciones, disposiciones y derivaciones de los haces. Por ejemplo, ciertas partes de los trayectos ópticos utilizados en el láser ultravioleta de femtosegundo 100 pueden incluir fibras ópticas. En algunas realizaciones, ciertas partes de los trayectos ópticos utilizados en el láser ultravioleta de femtosegundo 100 pueden incluir guías de onda ópticas. Ciertas partes de los trayectos ópticos utilizados en el láser ultravioleta de femtosegundo 100 pueden representar trayectos ópticos dentro de un medio, tal como el vacío, un espacio libre, un entorno gaseoso o la atmósfera. En algunas realizaciones dadas, se puede utilizar un elemento de polarización con al menos uno de un haz NIR 130, un haz visible 132 y un haz UV 134. En otra disposición, se puede omitir o sustituir el elemento de enfoque 106. En realizaciones particulares, al menos una parte de los componentes ópticos incluidos con el láser ultravioleta de femtosegundo 100 se pueden miniaturizar y combinar en una unidad compacta que tiene una masa y dimensiones exteriores relativamente pequeñas.

En la figura 1, el láser ultravioleta de femtosegundo 100 no está dibujado a escala, sino que es una representación esquemática. Se pueden hacer modificaciones, adiciones u omisiones al láser ultravioleta de femtosegundo 100 sin alejarse del alcance de la exposición. Los componentes y elementos del láser ultravioleta de femtosegundo 100, tal como se describen en la presente, pueden estar integrados o separados de acuerdo con las aplicaciones particulares. El láser ultravioleta de femtosegundo 100 se puede implementar utilizando más o menos componentes, o componentes diferentes, en algunas realizaciones.

Haciendo referencia ahora a la figura 2, se representa en forma de diagrama de flujo, un diagrama de bloques de elementos seleccionados de una realización de un método 200 para generar una fuente láser UV de fs, tal como se describe en la presente. El método 200 se puede implementar mediante el láser ultravioleta de femtosegundo 100 (véase la figura 1). Cabe destacar que ciertas operaciones descritas en el método 200 pueden ser opcionales o se pueden reordenar en realizaciones diferentes.

El método 200 comienza en el paso 202 dirigiendo un pulso láser NIR de fs a un cristal óptico no lineal. El paso 202 puede incluir enfocar el pulso láser NIR de fs. La longitud de onda (o frecuencia) de los fotones NIR del pulso láser NIR de fs se puede sintonizar o seleccionar según se desee. En el paso 204, al menos algunos de los fotones NIR se convierten a fotones visibles en una primera parte del cristal óptico no lineal mediante SHG. Los fotones visibles en el paso 204 pueden tener una frecuencia  $\omega_2$  mientras que los fotones NIR tienen una frecuencia  $\omega_1$ , tal como se especifica anteriormente. En el paso 206, al menos algunos de los fotones NIR y los fotones visibles se pueden convertir a fotones UV en una segunda parte del cristal óptico no lineal mediante THG. Los fotones UV en el paso 206 pueden tener una frecuencia  $\omega_3$ , tal como se especifica anteriormente. En el paso 208, los fotones UV se pueden separar espectralmente de un pulso de salida del cristal óptico no lineal, incluyendo el pulso de salida al menos algunos de los fotones NIR, al menos algunos de los fotones visibles y los fotones UV. En el paso 210, se

puede producir un pulso láser UV de fs. Los fotones UV se pueden producir en el pulso láser UV de fs que es coherente temporal y espacialmente con el pulso láser NIR de fs.

- 5 Tal como se expone en la presente, un método y un sistema para generar pulsos láser ultravioleta (UV) de femtosegundo (fs) facilitan la generación estable, robusta y ópticamente eficiente del tercer armónico de pulsos láser de fs, utilizando cristales de cuasi ajuste de fase periódicamente polarizados (PPQPMC) que tienen números diferentes de capas cristalinas periódicamente polarizadas que permiten una longitud de conversión larga sin conversión inversa y sin una dirección especial de ajuste de fase. El láser UV de fs puede tener una eficiencia de conversión alta y puede ser adecuado para un funcionamiento a potencia alta.

# REIVINDICACIONES

1. Una utilización de un cristal óptico no lineal (104) para generar pulsos láser ultravioleta de femtosegundo, comprendiendo la utilización:  
5    dirigir, al cristal óptico (104) no lineal, un primer pulso láser (130) desde una fuente láser (102), teniendo el primer pulso láser (130) una longitud de onda fundamental en una parte de infrarrojo cercano del espectro electromagnético y teniendo una duración de pulso de menos de 1000 femtosegundos,  
donde el cristal óptico (104) no lineal comprende un cristal de cuasi ajuste de fase periódicamente polarizado con una primera parte (104-1) y una segunda parte (104-2) orientadas de manera sucesiva con respecto a una orientación de los primeros fotones incidentes del primer pulso láser (130),  
10    donde la primera parte (104-1) del cristal de cuasi ajuste de fase periódicamente polarizado comprende un cristal de tantalato de litio estequiométrico dopado con óxido de magnesio periódicamente polarizado y la segunda parte (104-2) del cristal de cuasi ajuste de fase periódicamente polarizado comprende un cristal de óxido de germanio, bario y lantano, periódicamente polarizado,  
donde la primera parte (104-1) del cristal óptico (104) no lineal recibe los primeros fotones desde el primer pulso  
15    láser (130) y convierte al menos algunos de los primeros fotones a segundos fotones que tienen una segunda longitud de onda armónica de la longitud de onda fundamental, para generar un segundo pulso láser (132),  
la segunda parte (104-2) del cristal óptico (104) no lineal recibe al menos algunos de los primeros fotones y los segundos fotones y convierte al menos algunos de los primeros fotones y los segundos fotones a terceros fotones  
20    que tienen una tercera longitud de onda armónica de la longitud de onda fundamental, para generar un tercer pulso láser ultravioleta (134) de femtosegundo que tiene la duración del pulso,  
donde un primer patrón de intensidad de la sección transversal del primer pulso láser (130) se ajusta con un segundo patrón de intensidad de la sección transversal del tercer pulso láser (134), y  
donde un grosor total de la primera parte (104-1) o segunda parte (104-2) es del orden de 100 a 1000 micrones.
2. La utilización de la reivindicación 1, donde:  
25    la segunda parte (104-2) produce el primer pulso láser (130), el segundo pulso láser (132) y el tercer pulso láser (134) a partir del cristal óptico (104) no lineal.
3. La utilización de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 2, donde dirigir el primer pulso láser (130) comprende además enfocar el primer pulso láser (130) en el cristal óptico (104) no lineal.
4. La utilización de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, que comprende además:  
30    utilizar un filtro óptico (108) para separar espectralmente, en la salida del cristal óptico (104) no lineal, el tercer pulso láser (134) del primer pulso láser (130) y del segundo pulso láser (132).
5. La utilización de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, donde el cristal óptico (104) no lineal incluye capas periódicamente polarizadas que se sintonizan de acuerdo con la longitud de onda fundamental.

100 → LÁSER ULTRAVIOLETA DE FEMTOSEGUNDO

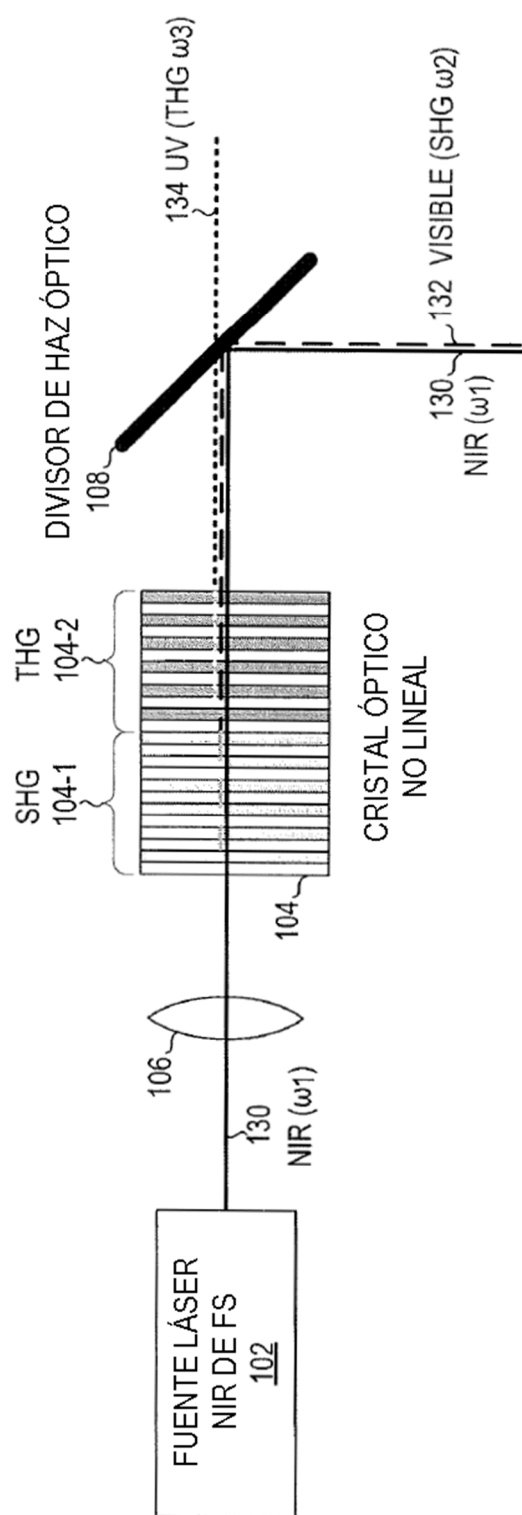


FIG. 1

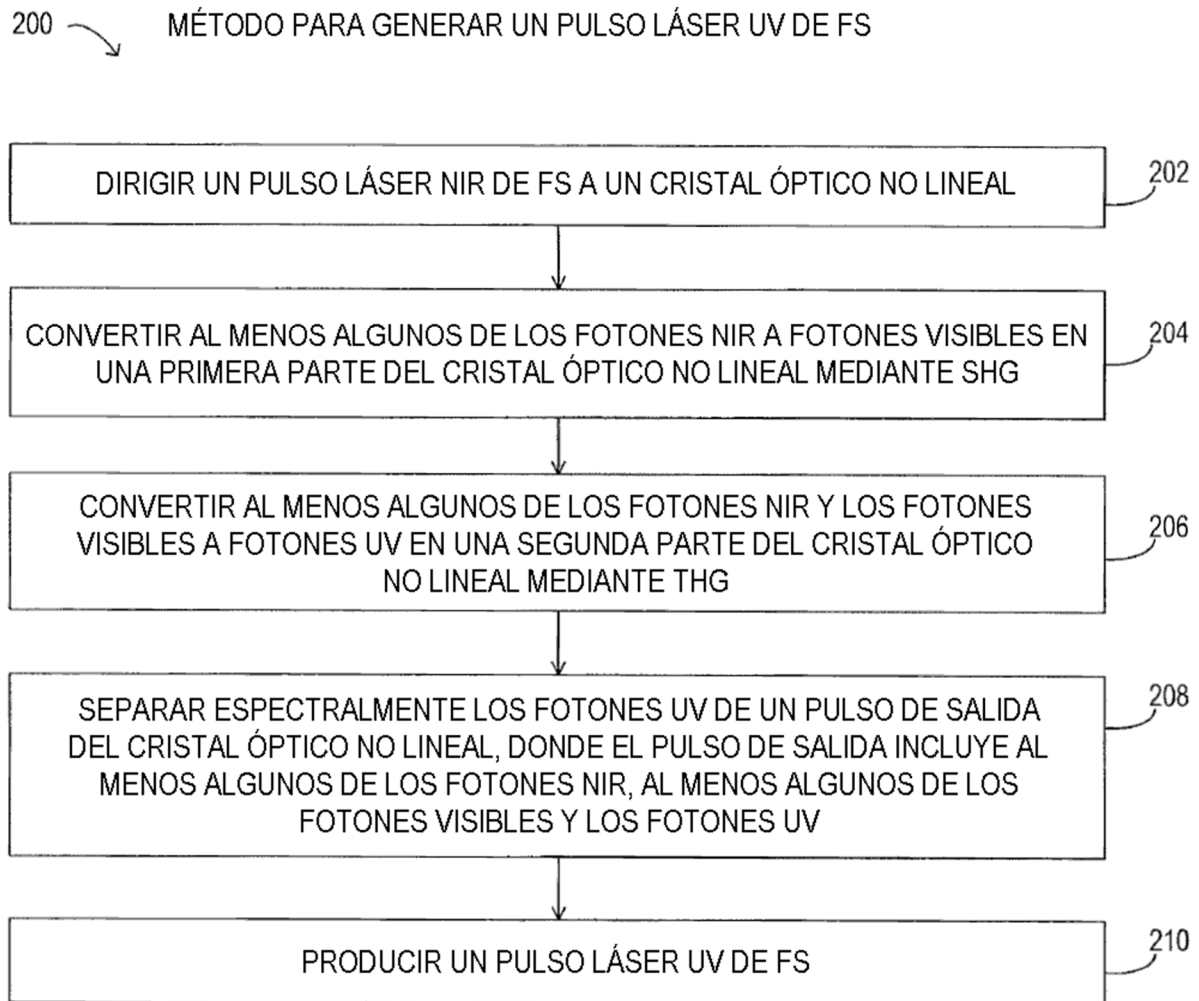


FIG. 2