(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 724 110**

(21) Número de solicitud: 201830207

(51) Int. CI.:

G01J 11/00 (2006.01)

(12) SOLICITUD DE PATENTE A1

(22) Fecha de presentación:

02.03.2018

(43) Fecha de publicación de la solicitud:

06.09.2019

(71) Solicitantes:

UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO / EUSKAL HERRIKO UNIBERTSITATEA (80.0%)
Barrio Sarriena, s/n
48940 Leioa (Bizkaia) ES;
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA (10.0%) y
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (10.0%)

(72) Inventor/es:

MONTERO SANTOS, Raúl;
LONGARTE ALDAMA, Asier;
LAMAS FREJO, Iker;
VILA ÁLVAREZ, Iván y
FERNÁNDEZ GARCÍA, Marcos

(74) Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

(54) Título: **DISPOSITIVO Y MÉTODO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE PULSOS ULTRACORTOS**

(57) Resumen:

Método para caracterización de un pulso ultracorto, que comprende: hacer llegar un pulso de referencia de duración conocida a un primer detector con una banda prohibida menor que la energía por fotón del pulso a caracterizar y a un segundo detector con una banda prohibida mayor que la energía por fotón del pulso a caracterizar y menor que dos veces la energía por fotón del pulso a caracterizar; obtener en dicho primer detector una señal monofotónica de referencia S_{α}^{ref} proporcional a la duración del pulso de referencia; obtener en dicho segundo detector una señal bifotónica de referencia S_{β}^{ref} proporcional a la duración del pulso de referencia; hacer llegar a los detectores un pulso ultracorto a caracterizar; obtener en dicho primer detector una señal monofotónica S_{α} proporcional a la duración del pulso ultracorto a caracterizar; obtener en dicho segundo detector una señal bifotónica S_{β} proporcional a la duración del pulso ultracorto a caracterizar; obtener la duración del pulso a caracterizar a partir de dichas señales monofotónicas, de dichas señales bifotónicas y de la duración conocida del pulso de referencia. Dispositivo para la caracterización de un pulso ultracorto.

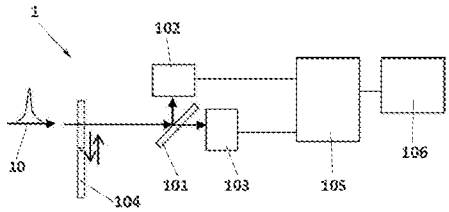

FIG. 1

ES 2 724 110 A1

DESCRIPCIÓN

DISPOSITIVO Y MÉTODO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE PULSOS ULTRACORTOS

CAMPO DE LA INVENCIÓN

La presente invención pertenece al campo de los dispositivos láser y los dispositivos empleados para la caracterización de la radiación láser. Concretamente, la invención está relacionada con dispositivos y métodos para la determinación de la duración de pulsos ultracortos.

ANTECEDENTES DE LA INVENCIÓN

Las características especiales de los pulsos láser ultracortos, típicamente de duración inferior a 1 picosegundo (1ps = 10^{-12} segundos) han dado lugar a multitud de aplicaciones científicas, tecnológicas, médicas e industriales, a pesar de que su manejo controlado supone todo un desafío tecnológico. Debido a los fenómenos de dispersión que sufren este tipo de pulsos en su propagación a través de los medios materiales, uno de los principales cuellos de botella está relacionado con el diagnóstico y control de sus características temporales. La duración de estos pulsos es inferior a la resolución de cualquier instrumento electrónico, lo que obliga a emplear métodos ópticos para su caracterización. En el más simple de ellos, denominado método de autocorrelación de intensidad (AC), el pulso cuyo perfil temporal se desea conocer se divide en dos réplicas que se hacen interaccionar a un retardo óptico variable en un medio óptico cuya respuesta es no-lineal con la intensidad (típicamente generación de segundo armónico) (Sager, L. and Oberlé, J." How to Measure the Characteristics of Laser Pulses" In Claude. Rullière (Ed.), *Femtosecond Laser Pulses – Principles and Experiments, Second Edition* (pp. 195-222). Springer New York. (2005) ISBN-0-387-01769-0). La amplitud de la respuesta del medio en función del retardo entre los pulsos viene dada por la integral de convolución de los pulsos, a partir de la cual se puede inferir el perfil temporal del pulso. Dicha relación no es unívoca, por lo que resulta necesario asumir que el pulso presenta una forma determinada en su perfil temporal (gaussiano, secante hiperbólica al cuadrado, lorentziano, etc.), lo que conlleva una cierta ambigüedad en el resultado. De forma análoga se puede obtener

una información más detallada del perfil temporal mediante correlación cruzada del pulso a diagnosticar con otro más corto cuyo perfil es conocido.

Sin embargo, la caracterización completa de un pulso láser no solo involucra el perfil temporal, sino también su espectro y fase. Existen técnicas más sofisticadas que permiten acceder a esta información. Entre ellas, las más populares son la autocorrelación interferométrica (IAC), la FROG (Frequency resolved optical gating) y la SPIDER (Spectral Phase interferometry for Direct Electric field Reconstruction). La técnica FROG consiste en recoger el espectro de la onda de segundo armónico generada al interaccionar las dos réplicas del pulso en un medio no lineal en función del retardo entre ambas. A continuación, mediante un algoritmo iterativo de reconstrucción, se extrae la fase espectral del pulso (Rick Trebino and Daniel J. Kane, "Using phase retrieval to measure the intensity and phase of ultrashort pulses: frequency-resolved optical gating," J. Opt. Soc. Am. A 10, 1101-1111 (1993)). En el método SPIDER la interacción en el medio no lineal se produce entre el pulso a diagnosticar y una réplica cuya fase ha sido alterada de forma controlada. De esta forma, se obtiene un interferograma espectral a partir del cual se puede obtener información de la fase del pulso (C. Iaconis and I. A. Walmsley, "Spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction of ultrashort optical pulses," Opt. Lett. **23**, 792-794 (1998)).

En general, las metodologías anteriores (FROG y SPIDER) y otras derivadas de ellas, proporcionan una información precisa de la distribución temporal del campo electromagnético, pero resultan costosas técnica y económicamente. Por este motivo, y a pesar de que la AC solo permite conocer el perfil temporal con cierto grado de ambigüedad y no proporciona ninguna información de la fase, esta técnica sigue siendo una de las más extendidas comercialmente debido a su simplicidad. En este sentido, el desarrollo de nuevos dispositivos y métodos más compactos, robustos, fáciles de manejar y baratos, capaces de proporcionar información sobre la duración de pulsos ultracortos en tiempo real, es un factor clave en el desarrollo de la tecnología láser.

El documento CN1145788C describe un método para medir la anchura de un pulso láser ultracorto emitido por una fuente láser basado en el efecto Talbot. Este método es una alternativa a las técnicas AC, FROG o SPIDER citadas anteriormente, que evita la utilización de cristales no lineales que son sensibles a la longitud de onda y

polarización. Sin embargo, al igual que las técnicas mencionadas, requiere de elementos necesarios para formación y detección de imagen y partes móviles.

El documento WO2006/103642A2 describe un método y aparato para determinar la anchura de pulsos láser ultracortos mediante un detector de absorción bifotónica. El detector de absorción bifotónica está formado por una microcavidad que tiene una región activa dispuesta entre un primer y un segundo reflector. Este método es una alternativa a la técnica de AC en la que se emplea un detector bifotónico embebido en una microcavidad. El método presenta la ventaja de que permite una caracterización espectral simultánea del pulso. Sin embargo, al igual que la técnica AC, requiere de elementos necesarios para dividir el haz a caracterizar para generar un haz de referencia, variar progresivamente el retardo relativo entre ambos mediante una línea de retardo óptico y volver a combinarlos para ser enviados al detector no lineal, lo cual involucra mayor número de elementos ópticos y partes móviles, que impiden la posibilidad de una realización compacta. Además, este método no permite la obtención de la duración de los pulsos en un solo disparo.

El documento CN104880258A describe un método para medir la anchura de un pulso ultracorto que utiliza varios espejos, un cristal no lineal y dos detectores fotoeléctricos pixelados (CCD o CMOS) que se utilizan para medir la traza de autocorrelación y el perfil espacial. Este método es una variación de la técnica de autocorrelación de intensidad de disparo único (A Brun. P Georges, G Le Saux and F Satin. “Single-shot characterization of ultrashort light pulses”. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 24 (1991) 1225-1233) en la que se introduce un segundo detector para corregir los errores derivados de la distribución espacial de intensidad y obtener una medida del perfil temporal más precisa.

En suma, los métodos propuestos en los documentos anteriores involucran medida con resolución temporal, basados en técnicas de autocorrelación, en las que el pulso a diagnosticar se divide en dos réplicas mediante un divisor de haz. Una de esas réplicas se hace llegar a un espejo móvil y la otra a uno fijo. A continuación ambas replicas se vuelven a combinar (en otro o el mismo divisor de haz) de manera que la variación de la posición del espejo móvil permite controlar el retardo relativo entre los pulsos al llegar a un sistema de detección con respuesta no lineal a la intensidad (típicamente la combinación de un cristal no lineal que genera una radiación, por ejemplo de segundo armónico, cuya intensidad presenta una dependencia no lineal de

la intensidad incidente y un detector lineal, o alternativamente un detector bifotónico, es decir, no lineal).

Por tanto, hay una necesidad de desarrollar un nuevo dispositivo y método para la determinación de la duración de un pulso láser ultracorto, que permita reducir o eliminar elementos ópticos, partes móviles y/o sistemas de imagen, de forma que proporcione una solución muy compacta y libre de alineamiento óptico.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCIÓN

La presente divulgación proporciona un nuevo dispositivo y método para la determinación en tiempo real de la duración de un pulso láser ultracorto. La duración del pulso se determina mediante la detección simultánea en dos detectores: uno con respuesta lineal y otro con respuesta no lineal a la intensidad. Es decir, la duración del pulso se obtiene a partir de la medida simultánea de la señal que produce un pulso láser ultracorto en los dos detectores mencionados.

En el contexto de la presente invención, se entiende por “tiempo real” un tiempo comprendido dentro de un rango que varía entre un valor inferior V_{min} y un valor superior V_{max}. El valor superior V_{max} puede ser igual o inferior a, por ejemplo, 5 minutos, tal como igual o inferior a 3 minutos, o igual o inferior a 1 minuto, o igual o inferior a 10 segundos, o igual o inferior a 1 segundo. Teniendo en cuenta la tecnología actual, el valor inferior V_{min} puede ser, de forma no limitativa, igual o superior a 1 µs (microsegundo, 10^{-6} segundos), tal como igual o superior a 0,1 ms (milisegundo, 10^{-3} segundos), o igual o superior a 1 ms, o igual o superior a 50 ms, o igual o superior a 100 ms. En realizaciones de la invención, el valor de tiempo comprendido dentro del rango que varía entre V_{min} y V_{max} es menor o igual al tiempo de disparo de los pulsos ultracortos a medir. Es decir, se entiende por medida en tiempo real la medida que se realiza entre disparo y disparo de los pulsos ultracortos.

Tras un sencillo calibrado, el dispositivo y método permiten obtener en tiempo real la duración del pulso ultracorto, su energía, a través de la lectura del detector lineal, y potencia de pico. El detector lineal proporciona una señal proporcional a la energía de los pulsos. Por tanto, su medida da información de la energía por pulso. La potencia de pico se obtiene como el cociente energía/duración del pulso.

El dispositivo y método permiten caracterizar pulsos láser ultracortos cuya longitud de onda varía en el rango de 200 a 3.000 nm (nanómetros, 10^{-9} metros), tal como en el rango de 650 a 2.000 nm.

El dispositivo y método de la invención son capaces, basándose en una medida electrónica, de proporcionar en tiempo real un valor de la duración efectiva de un pulso láser ultracorto, asumiendo cierta forma de su perfil temporal. Es decir, la determinación de la duración del pulso está basada en la aproximación de acuerdo con la cual la forma particular de la función que describe el perfil temporal es siempre la misma que la del pulso resultante del filtrado espectral en el calibrado (por ejemplo una gaussiana, una lorentziana, etc.), siendo la anchura de dicha función la única diferencia entre el pulso problema y el de referencia. A diferencia de los métodos de medida conocidos, basados en técnicas de autocorrelación, que utilizan medidas ópticas en las que se resuelve en tiempo el perfil temporal del pulso a partir de la interacción con una réplica del mismo a distintos retardos relativos, el dispositivo y método de la presente invención no realizan ninguna medida con resolución temporal, sino no que se proporciona un valor aproximado de la duración, sin medirla en el dominio del tiempo, sino infiriéndola a través de la señal electrónica de dos detectores. El dispositivo de la invención puede verse, por tanto, como un sensor capaz de proporcionar un valor aproximado de la duración de pulso. La determinación de la duración de pulso es indirecta y, por tanto, aproximada. Sin embargo, presenta importantes ventajas frente a otras técnicas en aquellos casos en los que no se requiere una información detallada del perfil de intensidad y la fase. Ejemplos de tales ventajas son: Proporciona la información en tiempo real (por ejemplo del orden de 1 ms), disparo a disparo; Resulta mucho más barato que cualquier otra técnica; El dispositivo es más compacto que los dispositivos de otras soluciones conocidas; El dispositivo puede implementarse integrado con un medidor de potencia o instrumento similar; Su manejo es más sencillo y no requiere alineamiento, ni conocimientos avanzados de óptica. Por todo ello, resulta muy útil en procedimientos de optimización de pulsos y como sistema de monitorización de láseres de pulso ultracorto, entre otros.

En un primer aspecto de la presente divulgación, se proporciona un método para la caracterización de un pulso ultracorto, que comprende: hacer llegar un pulso de referencia de duración conocida τ_{ref} a un primer detector que tiene una banda prohibida menor que la energía por fotón del pulso a caracterizar y a un segundo

detector que tiene una banda prohibida mayor que la energía por fotón del pulso a caracterizar y menor que dos veces la energía por fotón del pulso a caracterizar, obtener en dicho primer detector una señal monofotónica de referencia S_{α}^{ref} que tiene relación lineal con la intensidad del pulso de referencia y es proporcional a la duración τ_{ref} del pulso de referencia, obtener en dicho segundo detector una señal bifotónica de referencia S_{β}^{ref} que tiene relación no lineal con la intensidad del pulso de referencia y es proporcional a la duración τ_{ref} del pulso de referencia, hacer llegar a dicho primer detector o a un tercer detector que tiene una banda prohibida menor que la energía por fotón del pulso a caracterizar, y a dicho segundo detector o a un cuarto detector que tiene una banda prohibida mayor que la energía por fotón del pulso a caracterizar y menor que dos veces la energía por fotón del pulso a caracterizar, un pulso ultracorto a caracterizar, obtener en dicho primer detector o en dicho tercer detector una señal monofotónica S_{α} que tiene relación lineal con la intensidad del pulso ultracorto a caracterizar y es proporcional a la duración τ_{pulso} del pulso ultracorto a caracterizar, obtener en dicho segundo detector o en dicho cuarto detector una señal bifotónica S_{β} que tiene relación no lineal con la intensidad del pulso ultracorto a caracterizar y es proporcional a la duración τ_{pulso} del pulso ultracorto a caracterizar, obtener la duración τ_{pulso} del pulso a caracterizar a partir de dichas señales monofotónicas S_{α}^{ref}, S_{α}, de dichas señales bifotónicas S_{β}^{ref} , S_{β}, y de la duración conocida τ_{ref} del pulso de referencia.

En realizaciones de la invención, el pulso de referencia de duración conocida τ_{ref} se obtiene haciendo pasar el pulso ultracorto a caracterizar a través de un filtro que tiene un ancho de banda menor que el del pulso ultracorto a caracterizar, de forma que al reducir el ancho de banda del pulso ultracorto a caracterizar, el pulso sufre un ensanchamiento temporal hasta alcanzar aproximadamente la duración correspondiente a la transformada de Fourier de su espectro, pudiéndose determinar así su duración τ_{ref} a partir de la curva de transmisión o mediante otra caracterización, tal como una caracterización mediante AC u otra técnica.

En realizaciones de la invención, el pulso de referencia de duración conocida τ_{ref} y el pulso ultracorto a caracterizar se hacen llegar a los detectores correspondientes mediante un divisor de haz.

En realizaciones de la invención, el pulso de referencia de duración conocida τ_{ref} y el pulso ultracorto a caracterizar se hacen llegar al detector que tiene una banda prohibida menor que la energía por fotón del pulso a caracterizar después de transmitirse a través del detector que tiene una banda prohibida mayor que la energía por fotón del pulso a caracterizar y menor que dos veces la energía por fotón del pulso a caracterizar.

En realizaciones de la invención, la duración τ_{pulso} del pulso a caracterizar se obtiene como sigue: $\tau_{pulso}=\tau_{ref}\,(S_\beta^{ref}/(S_\alpha^{ref})^2)/\,(S_\beta/(S_\alpha)^2)$

En realizaciones de la invención, la longitud de onda del pulso ultracorto a caracterizar varía en el rango de 200 a 3.000 nanómetros.

En un segundo aspecto de la presente divulgación, se proporciona un dispositivo para la caracterización de un pulso ultracorto, que comprende: medios para obtener un pulso de referencia de duración conocida τ_{ref}, un primer detector que tiene una banda prohibida menor que la energía por fotón del pulso a caracterizar, un segundo detector que tiene una banda prohibida mayor que la energía por fotón del pulso a caracterizar y menor que dos veces la energía por fotón del pulso a caracterizar, medios ópticos para hacer llegar un pulso o una réplica del mismo al primer detector y al segundo detector, de forma que: cuando dicho pulso es el pulso de referencia de duración conocida τ_{ref}, en el primer detector se obtiene una señal monofotónica S_α^{ref} con relación lineal con la intensidad del pulso de referencia y proporcional a la duración τ_{ref} del pulso de referencia, y en el segundo detector se obtiene una señal bifotónica S_β^{ref} con relación no lineal con la intensidad del pulso de referencia y proporcional a la duración τ_{ref} del pulso de referencia; y cuando dicho pulso es el pulso a caracterizar, en el primer detector se obtiene una señal monofotónica S_α con relación lineal con la intensidad del pulso a caracterizar y proporcional a la duración τ_{pulso} del pulso a caracterizar, y en el segundo detector se obtiene una señal bifotónica S_β con relación no lineal con la intensidad del pulso a caracterizar y proporcional a la duración τ_{pulso} del pulso a caracterizar, medios para registrar dichas señales monofotónicas S_α^{ref}, S_α y dichas señales bifotónicas S_β^{ref} , S_β, medios para obtener la duración τ_{pulso} del pulso a caracterizar a partir de dichas señales monofotónicas S_α^{ref}, S_α, de dichas señales bifotónicas S_β^{ref} , S_β, y de la duración conocida τ_{ref} del pulso de referencia.

En un tercer aspecto de la presente divulgación, se proporciona un dispositivo para la caracterización de un pulso ultracorto, que comprende: medios ópticos para dividir un pulso o una réplica del mismo en dos haces, un primer detector que tiene una banda prohibida menor que la energía por fotón del pulso a caracterizar y un segundo detector que tiene una banda prohibida mayor que la energía por fotón del pulso a caracterizar y menor que dos veces la energía por fotón del pulso a caracterizar, dispuestos para recibir uno de dichos haces; medios para obtener un pulso de referencia de duración conocida τ_{ref}, dispuestos entre dichos medios ópticos para dividir un pulso o una réplica del mismo en dos haces, y dichos primer y segundo detector, de forma que cuando dicho pulso de referencia de duración conocida τ_{ref}, llega al primer detector se obtiene una señal monofotónica S_{α}^{ref} con relación lineal con la intensidad del pulso de referencia y proporcional a la duración τ_{ref} del pulso de referencia, y cuando dicho pulso de referencia de duración conocida τ_{ref}, llega al primer segundo detector se obtiene una señal bifotónica S_{β}^{ref} con relación no lineal con la intensidad del pulso de referencia y proporcional a la duración τ_{ref} del pulso de referencia; un tercer detector que tiene una banda prohibida menor que la energía por fotón del pulso a caracterizar y un cuarto detector que tiene una banda prohibida mayor que la energía por fotón del pulso a caracterizar y menor que dos veces la energía por fotón del pulso a caracterizar, dispuestos para recibir el otro de dichos haces, de forma que cuando dicho pulso a caracterizar llega al tercer fotodetector se obtiene una señal monofotónica S_{α} con relación lineal con la intensidad del pulso a caracterizar y proporcional a la duración τ_{pulso} del pulso a caracterizar, y cuando dicho pulso a caracterizar llega al cuarto detector se obtiene una señal bifotónica S_{β} con relación no lineal con la intensidad del pulso a caracterizar y proporcional a la duración τ_{pulso} del pulso a caracterizar, medios para registrar dichas señales monofotónicas S_{α}^{ref}, S_{α} y dichas señales bifotónicas S_{β}^{ref} , S_{β}, medios para obtener la duración τ_{pulso} del pulso a caracterizar a partir de dichas señales monofotónicas S_{α}^{ref}, S_{α}, de dichas señales bifotónicas S_{β}^{ref} , S_{β}, y de la duración conocida τ_{ref} del pulso de referencia.

En realizaciones de la invención, los medios para obtener el pulso de referencia de duración conocida τ_{ref} son un filtro que tiene un ancho de banda menor que el del pulso ultracorto a caracterizar, de forma que al atravesar el filtro, se reduce el ancho de banda del pulso ultracorto a caracterizar, experimentando el pulso un ensanchamiento

temporal hasta alcanzar aproximadamente la duración correspondiente a la transformada de Fourier de su espectro, pudiéndose determinar así su duración τ_{ref} a partir de la curva de transmisión o mediante otra caracterización, tal como una caracterización mediante AC u otra técnica.

En realizaciones de la invención, la duración τ_{pulso} del pulso a caracterizar se obtiene como sigue: $\tau_{pulso}=\tau_{ref}\,(S_\beta^{ref}/(S_\alpha^{ref})^2)/\,(S_\beta/(S_\alpha)^2)$

En realizaciones de la invención, los medios para registrar dichas señales monofotónicas S_α^{ref}, S_α y dichas señales bifotónicas S_β^{ref} , S_β, son un osciloscopio o un convertidor analógico/digital.

En realizaciones de la invención, los medios para obtener la duración τ_{pulso} del pulso a caracterizar son un módulo de procesado de señales.

En realizaciones de la invención, los medios ópticos son un divisor de haz que tiene una relación reflexión/transmisión tal que más del 50% de la luz es enviada al segundo detector.

En realizaciones de la invención, la longitud de onda del pulso ultracorto a caracterizar varía en el rango de 200 a 3.000 nanómetros.

En un cuarto aspecto de la presente divulgación, se proporciona un dispositivo medidor de energía o potencia que comprende un dispositivo como los descritos anteriormente.

Frente a los métodos y dispositivos de caracterización de pulsos láser ultracortos convencionales, en los que se lleva a cabo una medida completa del perfil temporal (y fase, en algunos casos) mediante técnicas de autocorrelación, el método y dispositivo de la presente divulgación permiten obtener la duración de los pulsos asumiendo cierta forma de su perfil temporal, empleando dos detectores, diferente de las de propuestas conocidas. El método y dispositivo propuestos no realizan ninguna medida con resolución temporal, sino no que se proporciona un valor aproximado de la duración, sin medirla en el dominio del tiempo, infiriéndola a través de la señal electrónica de los dos detectores y por tanto eliminando elementos ópticos, partes móviles y/o sistemas de imagen. Por tanto, el dispositivo puede resultar muy compacto, permitiendo su fabricación en unos mm^3 o incluso a escala menor, y prácticamente libre de

alineamiento óptico. El dispositivo se puede ver como un sensor capaz de proporcionar un valor aproximado de la duración de pulso.

Ventajas y características adicionales de la invención serán evidentes a partir de la descripción en detalle que sigue y se señalarán en particular en las reivindicaciones adjuntas.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

Para complementar la descripción y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, de acuerdo con un ejemplo de realización práctica de la misma, se acompaña como parte integrante de la descripción, un juego de figuras en el que con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

La figura 1 ilustra un esquema de un dispositivo electrónico basado en un sistema de de dos detectores (detección dual) para la determinación de la duración de pulsos láser ultracortos, de acuerdo con una posible realización de la invención.

La figura 2 ilustra un esquema de un dispositivo electrónico alternativo, también basado en un sistema de detección dual para la determinación de la duración de pulsos láser ultracortos, de acuerdo con otra posible realización de la invención.

La figura 3 ilustra un esquema de un dispositivo electrónico alternativo, también basado en un sistema de detección dual para la determinación de la duración de pulsos láser ultracortos, de acuerdo con otra posible realización de la invención.

La figura 4 ilustra un esquema de un dispositivo electrónico alternativo, también basado en un sistema de detección dual para la determinación de la duración de pulsos láser ultracortos, de acuerdo con otra posible realización de la invención.

La figura 5 muestra la traza de autocorrelación de un pulso problema de 1300 nm y la traza de autocorrelación del pulso de referencia obtenido mediante filtrado espectral del anterior.

La figura 6 muestra la traza de autocorrelación de un pulso problema de 800 nm y la traza de autocorrelación del pulso de referencia obtenido mediante filtrado espectral del anterior.

La figura 7 muestra la señal producida en los detectores de la realización de la figura 1 por un pulso de 1300 nm.

La figura 8 muestra la señal producida en los detectores de la realización de la figura 4 por un pulso de 800 nm.

La figura 9 muestra una comparación entre los resultado de la caracterización de pulsos láser ultracortos mediante esta invención y la técnica AC.

DESCRIPCIÓN DE UNA FORMA DE LLEVAR A CABO LA INVENCIÓN

En este texto, el término “comprende” y sus derivaciones (tal como “comprendiendo”, etc.) no deben entenderse en un sentido excluyente, es decir, estos términos no deben ser interpretados como que excluyen la posibilidad de que lo que se describe y se define pueda incluir elementos, etapas adicionales, etc.

En el contexto de la presente invención, el término “aproximadamente” y términos de su familia (como “aproximado”, etc.) deben interpretarse como indicando valores muy cercanos a aquellos que acompañan a dicho término. Es decir, una desviación dentro de límites razonables con respecto a un valor exacto deberían aceptarse, porque un experto en la materia entenderá que tal desviación con respecto a los valores indicados puede ser inevitable debido a imprecisiones de medida, etc. Lo mismo aplica a los términos “unos”, “alrededor de” y “sustancialmente”.

La descripción que sigue no debe tomarse en un sentido limitado, sino que se proporcionan solamente con el propósito de describir principios amplios de la invención. Las siguientes realizaciones de la invención se describirán a modo de ejemplo, con referencia a las figuras arriba citadas, que muestran aparatos y resultados de acuerdo con la invención.

La figura 1 esquematiza un dispositivo electrónico 1 para la determinación de la duración de pulsos láser ultracortos de acuerdo con una posible realización de la invención. El dispositivo 1 tiene dos detectores 102, 103: Uno de los detectores 103 tiene una banda prohibida (en inglés, bandgap) menor que la energía por fotón del pulso a medir, por lo que al recibir el pulso láser ultracorto a medir, este detector 103 produce una señal monofotónica S_α proporcional a la intensidad I y a la duración efectiva de pulso Δt en el rango de frecuencias o longitudes de onda de trabajo. Con

otras palabras, este detector 103 tiene una respuesta lineal a la intensidad del pulso a medir en dicho rango de frecuencias o longitudes de onda de trabajo. Como detector 103 con respuesta lineal a la intensidad del pulso puede usarse, por ejemplo, de forma no limitativa, un fotodiodo de germanio (Ge), un fotodiodo de arseniuro de indio y galio (InGaAs), un detector piroeléctrico para el caso de pulsos intensos, o un detector pixelado, tal como CCD o CMOS u otros. El otro detector 102 tiene una banda prohibida mayor que la energía por fotón del pulso a medir y menor que dos veces la energía por fotón del pulso a medir, por lo que al recibir el pulso láser ultracorto a medir, este detector 102 produce una señal S_β correspondiente a una absorción bifotónica proporcional a la duración del pulso Δt y a su intensidad al cuadrado I^2 en el rango de frecuencias o longitudes de onda de trabajo. Con otras palabras, este detector 102 tiene una respuesta no lineal a la intensidad del pulso a medir en dicho rango de frecuencias o longitudes de onda de trabajo. Como detector 102 con respuesta no lineal a la intensidad del pulso puede usarse, por ejemplo, de forma no limitativa, un fotodiodo de silicio (Si), un detector pixelado, tales como CMOS, CCD u otros, o, en general, cualquier otro que proporcione una respuesta no lineal apreciable y cuya respuesta lineal sea despreciable en el rango espectral deseado. En la figura 1, el pulso láser ultracorto a medir se ha identificado con la referencia 10. Se trata de un pulso de duración inferior a 1 picosegundo (1ps = 10^{-12} segundos) y una longitud de onda central en el rango 200 a 3.000 nm. El dispositivo láser, no ilustrado, con el que se ha producido el pulso 10, queda fuera del alcance de la presente invención. Nótese que en función de la respuesta de los detectores, se deberá seleccionar una longitud de onda del pulso en un rango más limitado. Por ejemplo, si como detector no lineal se utiliza un fotodiodo de silicio (Si), la longitud de onda central del pulso debe estar en el rango 1.150-2.000 nm. De la misma forma, si se desea caracterizar un pulso ultracorto de una determinada longitud de onda, como detector lineal debe seleccionarse un detector que proporcione una respuesta lineal en esa longitud de onda, y como detector no lineal debe seleccionarse un detector que proporcione una respuesta no lineal en esa longitud de onda.

En la implementación de la figura 1, para hacer llegar la radiación 10 a ambos detectores 102, 103, se emplea un divisor de haz 101. Las flechas a la entrada y salida del divisor de haz 101 indican el camino óptico que sigue el pulso láser a diagnosticar. En realizaciones de la invención, con el fin de obtener una relación señal ruido

adecuada en ambos detectores 102, 103, se elige un divisor de haz 101 con una relación reflexión/transmisión tal que más del 50% de la luz que llega al divisor sea enviada al detector con respuesta bifotónica (es decir, al detector 102). Es necesario alcanzar una relación señal/ruido apropiada en ambos detectores, en especial en el no lineal, que normalmente produce menos señal. Por ejemplo 100 nJ para una sección transversal del haz de 2 mm FWHM.

Alternativamente, es posible emplear una configuración de dispositivo electrónico 2 para la determinación de la duración de pulsos láser ultracortos como la mostrada en la figura 2, en la que los pulsos llegan al detector con respuesta lineal 203 después de transmitirse a través de detector no lineal 202. En esta configuración, todo lo indicado en la descripción de la figura 1 relativo a los detectores 102, 103 es aplicable a los detectores 202, 203, respectivamente, de la figura 2. Esta segunda solución permite diseños aún más compactos. Como puede observarse en la figura 2, esta configuración no necesita divisor de haz.

El dispositivo 1-2 incluye también la óptica 104, 204 necesaria para obtener una medida de referencia. En una posible realización, se utiliza un filtro 104, 204 que puede ser de paso de banda o de otro tipo, para reducir el ancho de banda del pulso 10, 20 a caracterizar y obtener así una medida de referencia de duración conocida. Esta óptica 104, 204 para calibrado se retira para realizar las medidas del pulso a caracterizar.

La figura 3 ilustra otra realización alternativa de dispositivo electrónico 3 para la determinación de la duración de pulsos láser ultracortos, en la que el haz se divide mediante un divisor de haz 301, similar al divisor de haz 101 de la figura 1, para la medida simultánea de la referencia en dos sistemas compuestos por dos detectores cada uno: en cada una de las salidas del divisor de haz 301 se sitúa un detector con respuesta no lineal 302, 302' seguido de un detector con respuesta lineal 303, 303'. Es decir, cada par formado por detector no lineal seguido de detector lineal tiene una configuración similar a la de la figura 2, es decir, los pulsos llegan al detector con respuesta lineal 303 (o 303') después de transmitirse a través de detector no lineal 302 (o 302'). En esta configuración, todo lo indicado en la descripción de la figura 1 relativo a los detectores 102, 103 es aplicable a los detectores 302, 302', 303, 303', respectivamente, de la figura 3. Delante de uno de los sistemas o conjunto de detectores (302, 303 o 302', 303') se instala un filtro 304, por ejemplo de paso de

banda, para obtener el calibrado. En esta realización la medida de referencia se lleva a cabo simultáneamente con la medida del pulso problema, por lo que, a diferencia de las implementaciones anteriores, en ésta el filtro 304 no se retira una vez realizado el calibrado.

En implementaciones en las que la señal de absorción bifotónica S_β del detector 102, 202, 302, 302', sea baja, bien porque el coeficiente de absorción bifotónica del detector no lineal 102, 202, 302, 302' sea bajo, o bien porque la intensidad del pulso a caracterizar 10 sea baja, el dispositivo puede incluir óptica para enfocar la radiación 10 sobre el detector 102, 202, 302, 302'. Ejemplos no limitativos de elementos ópticos que pueden usarse para tal efecto son un espejo esférico, un espejo parabólico, una lente, u otros. La figura 4 muestra un dispositivo electrónico 4 para la determinación de la duración de pulsos láser ultracortos, adecuado para estas circunstancias. Esta realización es especialmente adecuada para caracterizar la duración de pulsos láser ultracortos en la región de 650-1150 nm.

En la figura 4, además de un divisor de haz 401 para hacer llegar a cada uno de los detectores una réplica del pulso a medir con la intensidad apropiada, y dos detectores 402, 403 (detector 403 que presenta una respuesta lineal a la intensidad del pulso a medir y detector 402 que presenta una respuesta no lineal a la intensidad del pulso a medir) configurados como en la figura 1, se incluye un espejo 407, en este caso esférico, para enfocar la radiación sobre el detector 402. Nótese que en cualquiera de las configuraciones anteriores (figuras 1-3) puede usarse óptica para enfocar la radiación sobre el detector no lineal. Como se ha dicho, el espejo 407 (cóncavo en esta realización) es necesario cuando la intensidad del haz o coeficiente de absorción no lineal son bajos y no se produce una buena relación señal/ruido en el detector no lineal 402.

Además, en la realización de la figura 4 se emplea un atenuador 408 delante del otro detector 403, para evitar que llegue excesiva radiación y mantener la señal dentro del rango de linealidad del detector (por ejemplo, <1 V). Nótese que en cualquiera de las configuraciones anteriores (figuras 1-3) puede usarse un atenuador delante del detector lineal. En realizaciones de la invención, se puede evitar la necesidad de incluir el atenuador 408 empleando un divisor de haz con una relación reflexión/transmisión mayor. Por ejemplo, si se emplea un divisor de haz con una relación 82/18, el atenuador 408 puede ser necesario. Si, por ejemplo, se utiliza un divisor de haz con

una relación 99/1, sería posible la operación sin el atenuador 408. Como detector 403 con respuesta lineal a la intensidad del pulso puede usarse, por ejemplo, de forma no limitativa, un fotodiodo de silicio (Si), un fotodiodo de germanio (Ge), un fotodiodo de arseniuro de indio y galio (InGaAs), un detector piroeléctrico para el caso de pulsos intensos o un detector pixelado, tal como CCD o CMOS u otros. Como detector 402 con respuesta no lineal a la intensidad del pulso puede usarse, por ejemplo, un fotodiodo galio-fósforo (GaP), un fotodiodo de carburo de silicio (SiC), un detector pixelado, tal como CCD o CMOS u otros, o cualquier otro que proporcione una respuesta no lineal apreciable y cuya respuesta lineal sea despreciable en el rango de la longitud de onda del pulso a caracterizar.

El método de medida de la duración de un pulso láser ultracorto requiere una medida de referencia previa de un pulso de duración conocida. Para ello, el dispositivo 1-4 incluye también la óptica 104, 204, 304, 404 necesaria para obtener dicha medida de referencia. En una posible realización, se utiliza un filtro 104, 204, 304, 404, que puede ser de paso de banda o de otro tipo, para reducir el ancho de banda del pulso 10 a caracterizar y obtener así una medida de referencia de duración conocida. En las implementaciones de las figuras 1, 2 y 4, el filtro 104, 204, 404 se dispone en el camino óptico antes del divisor de haz 101, 404 en las figuras 1 y 4 (en la figura 2 no hay divisor de haz, por lo que el filtro se dispone entre la fuente de luz, no ilustrada, y el primer detector 202), y se elige, por ejemplo, con un ancho de banda de entre 4 y 20 veces menor que la del pulso a medir 10. Por ejemplo, se elige el filtro 104, 204, 404 con un ancho de banda entre 4 y 15 veces menor, tal como entre 8 y 15 veces menor. De esta manera, al reducir el ancho de banda del pulso (por ejemplo del pulso a medir 10), el pulso sufre un ensanchamiento temporal hasta alcanzar aproximadamente la duración correspondiente a la transformada de Fourier de su espectro, pudiéndose determinar así su duración τ_{ref} a partir de la curva de transmisión o mediante otra caracterización, tal como una caracterización mediante AC u otra técnica. Las flechas que aparecen en las figuras 1, 2 y 4 junto al elemento 104, 204, 404 indican que dicho elemento se ha de insertar en el camino del haz para realizar el calibrado y posteriormente retirarlo para medir la duración de los pulsos problema. La validez del calibrado puede extenderse durante horas incluso días, siempre que no se modifiquen características del haz como el perfil espacial, longitud de onda o alineamiento.

El dispositivo 1-4 incluye también un medio electrónico 105, 205, 305, 405 para registrar y digitalizar las señales de ambos detectores 102, 103 (o 202, 203; o 302, 303, 302', 303', o 402, 403). Este medio electrónico 105-405 puede ser, por ejemplo, un osciloscopio o un convertidor analógico/digital, que puede incluir medios de memoria para almacenar las señales registradas. Por último, el dispositivo 1-4 tiene un medio de procesado 106, 206, 306, 406 para procesar las señales registradas procedentes del medio electrónico 105-405. El medio de procesado 106-406 puede implementarse mediante un procesador o conjunto de procesadores, para ejecutar el algoritmo para obtener la duración de pulso a partir de las lecturas de los dos detectores 102, 103 (o 202, 203; o 302, 303, o 402, 403) y la medida de referencia (en la implementación de la figura 3, obtenido con los detectores adicionales 302', 303'). Pueden utilizarse alternativamente medios de memoria externos al medio electrónico 105-405, por ejemplo incluidos en el medio de procesado 106-406 o externos al mismo, para almacenar las señales registradas y los resultados de ejecución del algoritmo, o cualquier otro dato que haya que almacenar.

Cuando como detector no lineal se utiliza un fotodiodo de silicio, la implementación de la figura 1 (y figuras 2-3, si se usan similares detectores) es adecuada para determinar la duración de un pulso láser cuya longitud de onda varía en el rango de 1.150-2.000 nm (nanómetros, 10^{-9} metros). El rango de operación está determinado por el bandgap de los detectores. Nótese que la configuración óptica elegida depende principalmente de la intensidad de los haces y los coeficientes de absorción. Por su parte, cuando como detector no lineal se utiliza un fotodiodo de galio-fósforo, la implementación de la figura 4 es adecuada para determinar la duración de un pulso láser cuya longitud de onda varía en el rango de 650-1.150 nm. El espejo cóncavo es necesario para aumentar la señal del detector no-lineal. Un haz de mayor intensidad (por ejemplo 100 veces más intenso) no requeriría óptica de enfoque. El atenuador es necesario para reducir la intensidad del haz que llega al detector lineal.

En cualquiera de las implementaciones, el método para la determinación de la duración de un pulso láser ultracorto se realiza como sigue:

Paso 1. En primer lugar se ha de tomar una medida de referencia. Para ello se inserta el filtro 104, 204, 404, por ejemplo filtro de paso de banda, en el camino del haz 10, 20, 40 del pulso a medir, lo que produce un estiramiento del haz hasta alcanzar la

duración τ_{ref}. Las figuras 5 y 6 muestran la traza de autocorrelación (AC), obtenida por medio de un autocorrelador de intensidad, correspondiente al pulso 10, 40 (en la figura 5, por ejemplo de 1300 nm, usando la implementación de la figura 1; en la figura 6, por ejemplo de 800 nm, usando la implementación de la figura 4) cuando su duración corresponde al límite por transformada de Fourier (LTF) (puntos negros), y al pulso de referencia del filtrado mediante el filtro 104, 404 (puntos grises). La radiación de este haz estirado es conducida por el divisor de haz a los dos detectores: En la figura 1, por el divisor de haz 101 a los detectores 102, 103; lo mismo ocurre en la figura 2, sin divisor de haz, pasando primero por el detector 202 y después por el detector 203; en la figura 4 por el divisor de haz 401 y elementos ópticos adicionales 407, 408, hacia los detectores 402, 403. En la implementación de la figura 3, la medida de referencia se toma mediante un filtro 304, por ejemplo de paso de banda, que está permanentemente situado a una de las salidas del divisor de haz 301. Por eso se necesita el doble de detectores: dos para la medida de referencia y dos para la medida del pulso a caracterizar. Al incidir el haz estirado en el detector 103, 203, 303', 403, se produce en éste una respuesta lineal, es decir, una señal monofotónica S_{α}^{ref} proporcional a la intensidad y a la duración τ_{ref} del pulso estirado. Al incidir el haz estirado en el otro detector 102, 202, 302', 402, se produce en éste una respuesta no lineal, es decir, una señal bifotónica S_{β}^{ref} proporcional a la intensidad al cuadrado del pulso y a la duración τ_{ref} del pulso estirado. Estas dos señales S_{α}^{ref} y S_{β}^{ref} producidas en los detectores lineal y no lineal respectivamente se registran por el medio electrónico 105-405 y se almacenan en memoria. Para obtener una medida de calidad y obtener una buena relación señal/ruido sin sobrepasar los rangos aceptables por los detectores, se puede ajustar la intensidad del haz 10, 20, 30, 40. A modo de ejemplo, la figura 7 (panel superior) ilustra el transitorio procedente de un detector (en este caso, un fotodiodo de Si) 102 y generado con un pulso 10 de 1300 nm y 10 nJ con la implementación de la figura 1. La señal S_{β}^{ref} se obtiene como la integral de dicho transitorio. La figura 7 (panel inferior) también ilustra el transitorio procedente de un detector (en este caso, un fotodiodo de Ge) 103 y generado con un pulso 10 de 1300 nm y 1 nJ con la implementación de la figura 1. La señal S_{α}^{ref} se obtiene como la integral de dicho transitorio. De forma análoga, la figura 8 (línea negra) ilustra el transitorio procedente de un detector (en este caso, un fotodiodo de GaP) 402 y generado con un pulso 40 de 800 nm y 60 nJ enfocado con un espejo esférico f=50

mm con la implementación de la figura 4. La señal S_β^{ref} se obtiene como la integral de dicho transitorio. La figura 8 (línea gris) también ilustra el transitorio procedente de un detector (en este caso, un fotodiodo de Si) 403 y generado con un pulso 40 de 800 nm y <1 nJ con la implementación de la figura 4. La señal S_α^{ref} se obtiene como la integral de dicho transitorio.

Una vez almacenados en memoria los valores de referencia S_α^{ref} y S_β^{ref}, junto con el valor τ_{ref} introducido por el usuario, estos datos son válidos siempre que no varíen las condiciones espaciales (modo espacial o alineamiento) del haz a caracterizar.

Paso 2. En las realizaciones de las figuras 1, 2 y 4, se retira el filtro 104, 204, 404 (por ejemplo filtro de paso de banda), de forma que el haz 10, 20, 40 que incide en el divisor de haz 101, 401 (o que llega al detector 202 en la figura 2) es el haz del pulso ultracorto original cuya duración se desea medir, es decir, del pulso a caracterizar. De esta forma, la radiación del haz del pulso ultracorto es conducida por el divisor de haz 101, 401 a los dos detectores 102, 103 (402, 403) o directamente al detector 202. Nótese que en la realización de la figura 3, no se retira el filtro 304, sino que, al haber dos juegos de detectores en cada haz dividido, la medida de referencia y del pulso a caracterizar se puede realizar simultáneamente. Al incidir el haz en el detector 103, 203, 303, 403, se produce en éste una señal monofotónica S_α proporcional a la intensidad y a la duración del pulso τ_{pulso}, mientras que al incidir el haz en el detector 102, 202, 302, 402, se produce en éste una señal bifotónica S_β proporcional a la intensidad al cuadrado del pulso y a la duración τ_{pulso} del pulso. Estas dos señales S_α y S_β se registran por el medio electrónico 105-405 y se almacenan en memoria. Se ha de notar que al retirar el filtro 104, 204, 404 se produce un amento importante de intensidad del haz 10, 20, 40, pues el filtro además de reducir el ancho de banda, reduce la intensidad de haz, por lo que en este momento se puede volver ajustar su intensidad (del haz incidente) para mantener la señal en ambos detectores 102, 103; 202, 203; 402, 403; dentro de los rangos óptimos de los detectores.

Paso 3. En el medio de procesado de señal 106-406 se ejecuta el algoritmo mediante el que se obtiene la duración de pulsos, que responde a la siguiente ecuación:

$$\tau_{pulso}=\tau_{ref}\,(S_\beta^{ref}/(S_\alpha^{ref})^2)/\,(S_\beta/(S_\alpha)^2)$$

La duración del pulso se obtiene mediante un software que corre sobre el procesador 106-406 en cada disparo del láser. El detector lineal proporciona una señal proporcional a la energía de los pulsos. Por tanto, su medida proporciona directamente la energía por pulso (cuando el detector está calibrado en energía). Es decir, la energía es proporcional a S_α. La potencia de pico se obtiene como el cociente de energía / duración de pulso.

El método de medida es indirecto ya que se asume que la forma del perfil temporal (gaussiana, secante hiperbólica al cuadrado, lorentziana, etc.) del pulso problema (pulso a caracterizar) es igual a la del pulso de referencia generado mediante filtrado espectral (filtro 104, 204, 304, 404). Por este motivo, el método y dispositivo de la invención proporcionan muy buenos resultados en el caso de pulsos cuyo perfil temporal muestra una estructura sencilla. Concretamente, el método y dispositivo presentan importantes ventajas frente al resto de soluciones en aquellos casos en los que no se requiere una información detallada del perfil de intensidad y la fase. Por ejemplo: Proporciona la información tiempo real, disparo a disparo. Resulta más barato que cualquier otra técnica. Más compacto que otras alternativas. Su manejo es más sencillo y no requiere conocimientos de óptica de pulsos ultracortos. Por todo ello resulta muy útil en procedimientos de optimización de pulsos y como sistema de monitorización de láseres de pulso ultracorto.

A continuación se describen dos ejemplos basados en las implementaciones de las figuras 1 y 4. El primer ejemplo se ha utilizado para determinar la duración de un pulso láser cuya longitud de onda varía en el rango de 1150-2000 nm (nanómetros, 10^{-9} metros) y con el segundo ejemplo se ha determinado la duración de un pulso láser cuya longitud de onda varía en el rango de 650-1150 nm.

Ejemplo 1

Se ha implementado el dispositivo 1 de la figura 1 para determinar la duración de un pulso láser cuya longitud de onda central es de 1300 nm. Se ha elegido la siguiente configuración: El detector 102 con respuesta no lineal a la intensidad del pulso es un fotodiodo de silicio (Si). El detector 103 con respuesta lineal a la intensidad del pulso es un fotodiodo de germanio (Ge). Se elige un divisor de haz 101 que refleja el 90% de la radiación hacia el fotodiodo de silicio (Si) 102 y transmite el 10% restante al fotodiodo de germanio (Ge) 103. El divisor de haz 101 se ha implementado mediante

una lámina de cuarzo fundido con un recubrimiento parcial de aluminio (Al), de forma que proporciona una reflexión del 90%. Nótese que enviando el haz reflejado al detector no lineal 102 se evita que los efectos de dispersión del pulso debidos a la propagación a través del divisor de haz 101 tengan influencia el resultado final. La óptica 104 para reducir el ancho de banda del pulso a medir se ha implementado mediante un filtro de paso banda de 10 nm (FWHM). Como medios electrónicos 105 para registrar y digitalizar las señales de ambos detectores se ha usado un osciloscopio de 500MHz de ancho de banda. Para procesar los datos procedentes del osciloscopio y obtener la duración del pulso ultracorto, se ha usado un ordenador personal (PC) 106 debidamente programado para procesar dichos datos.

Esta configuración se empleó en la caracterización de un tren de pulsos láser con una longitud de onda central de 1300 nm y un ancho de banda de 70 nm procedente de un amplificador paramétrico bombeado con un láser de Ti:zafiro a una frecuencia de repetición de 1 KHz (no ilustrado). La energía de pulso a la entrada del dispositivo 1 se controla mediante un filtro neutro (no ilustrado) hasta obtener señal apreciable en ambos detectores 102, 103, dentro del intervalo de respuesta lineal del detector de Germanio (20-200nJ/pulso). La sección transversal del haz es de 2 mm (FWHM).

De acuerdo con el método propuesto, en primer lugar se obtuvo una medida de referencia con el filtro de paso de banda 104. La duración del pulso resultante del filtrado τ_{ref} se determinó a partir de una medida de autocorrelación (250 fs = $250x10^{-15}$ segundos FWHM, ver figura 5). Se ha comprobado que este valor τ_{ref} es independiente (<7% de desviación) de la dispersión (GDD) del pulso 10, al menos cuando esta se encuentra en el rango 0-2000 fs^2. Esto permite utilizar los pulsos del haz laser a diagnosticar como referencia sin necesidad de tener información previa de su fase o su duración. El valor τ_{ref} (250 fs) junto con los promedios S_β^{ref} y S_α^{ref} resultantes de 1000 muestras de las señales procedentes de los detectores 102 y 103 respectivamente registrados mediante el osciloscopio son almacenados en el disco duro del PC 106 para su posterior aplicación.

A continuación se retira el filtro 104 y se registran en tiempo real las señales S_β y S_α de los detectores 102 y 103 correspondientes a los pulsos a caracterizar. Finalmente, la duración de pulsos problema se obtiene en tiempo real (en 10 ms cuando el sistema de registro de la señal y digitalización 105 es un osciloscopio; este tiempo se reduce a

1 ms empleando un sistema de integradores analógicos y un tarjeta digitalizadora para registrar y digitalizar las señales) mediante el PC 106 programado para procesar los datos procedentes del osciloscopio (S_β y S_α) y los valores τ_{ref} , S_β^{ref} y S_α^{ref} almacenados en memoria como:

$$\tau_{pulso}=\tau_{ref}\,(S_\beta^{ref}/(S_\alpha^{ref})^2)/\,(S_\beta/(S_\alpha)^2)$$

Los resultados de este ejemplo se han comparado con los obtenidos por medio de técnicas de autocorrelación convencionales en el caso de pulsos de duración en el intervalo 35-300 fs. Los resultados están recogidos en la figura 9 (aspas). El eje de ordenadas representa los valores de duración de pulso obtenidos con la implementación de la figura 1, como resultado del promedio de la medida de 128 pulsos laser, y el de abscisas representa los valores obtenidos para los mismos pulsos mediante autocorrelación de intensidad. La línea a trazos se muestra como referencia visual.

Ejemplo 2

Se ha implementado el dispositivo 2 de la figura 4 para determinar la duración de un pulso láser cuya longitud de onda central de 800 nm. Se ha elegido la siguiente configuración: El detector 402 con respuesta no lineal a la intensidad del pulso es un fotodiodo de galio-fósforo (GaP). El detector 403 con respuesta lineal a la intensidad del pulso es un fotodiodo de silicio (Si). Se elige un divisor de haz 401 que refleja el 82% de la radiación hacia el fotodiodo de galio-fósforo (GaP) 402 y transmite el 18% restante al fotodiodo de silicio (Si) 403. En este caso fue necesario colocar un atenuador 408 delante del detector de silicio (Si) 403 hasta ajustar el máximo de señal a unos 100-200mV). También se colocó un espejo esférico de aluminio (Al) 407 con f=5 cm para aumentar la intensidad del haz sobre el detector de galio-fósforo (GaP) 402 para favorecer la absorción bifotónica en este detector 402. El divisor de haz 401 se ha implementado mediante una lámina de cuarzo fundido con un recubrimiento parcial de aluminio (Al), de forma que proporciona una reflexión del 82%. La óptica 404 para reducir el ancho de banda del pulso a medir se ha implementado mediante un filtro de paso banda 404 de 3 nm. Como medios electrónicos 405 para registrar y digitalizar las señales de ambos detectores se ha usado un osciloscopio de 500MHz de ancho de banda. Para procesar los datos procedentes del osciloscopio y obtener la

duración del pulso ultracorto, se ha usado un ordenador personal (PC) 406 debidamente programado para procesar dichos datos.

Esta configuración se empleó en la caracterización de un tren de pulsos láser con una longitud de onda central de 800 nm y un ancho de banda de 25 nm procedente de un láser de Ti:zafiro a una frecuencia de repetición de 1 KHz (no ilustrado). La energía de pulso a la entrada del dispositivo 4 (10-100nJ/pulso) se controla mediante un filtro neutro (no ilustrado) hasta obtener señal suficiente pero no excesiva en ambos detectores 402, 403 (20-200 mV). La sección transversal (diámetro) del haz es de 8 mm (FWHM) pero se reduce a 3 mm mediante una apertura circular (iris) para acomodarla al tamaño de los detectores empleados (3.6 mm x 3.6 mm).

De acuerdo con el método propuesto, en primer lugar se obtuvo una medida de referencia con el filtro de paso de banda 404. La duración del pulso resultante del filtrado τ_{ref} (385 fs = 385 x 10^{-15} segundos, FWHM, ver figura 6) se determinó a partir de una medida de autocorrelación. El valor τ_{ref} junto con los promedios S_β^{ref} y S_α^{ref} resultantes de 1000 muestras de las señales procedentes de los detectores 402 y 403 respectivamente registrados mediante el osciloscopio 405 son almacenados en el disco duro del PC 406 para su posterior aplicación.

A continuación se retira el filtro 404 y se registran en tiempo real las señales S_β y S_α de los detectores 402 y 403 correspondientes a los pulsos a caracterizar.

Finalmente, la duración de pulsos problema se obtiene en tiempo real (en 10 ms con el sistema descrito osciloscopio-PC; este tiempo se reduce a 1 ms empleando un sistema de integradores analógicos para las señales de los detectores, un digitalizador para registrar los valores de la integración y un PC para el almacenamiento y procesado de datos) mediante el PC 406 programado para procesar los datos procedentes del osciloscopio (S_β y S_α) y los valores τ_{ref} , S_β^{ref} y S_α^{ref} almacenados en memoria como:

$$\tau_{pulso}=\tau_{ref}\,(S_\beta^{ref}/(S_\alpha^{ref})^2)/\,(S_\beta/(S_\alpha)^2)$$

Los resultados de este ejemplo se han comparado con los obtenidos por medio de un autocorrelador comercial en el caso de pulsos de duración en el intervalo 35-300 fs. Los resultados están recogidos en la figura 9 (puntos y círculos). El eje de ordenadas

representa los valores de duración de pulso obtenidos con la implementación de la figura 4, como resultado del promedio de la medida de 128 pulsos láser, y el de abscisas representa los valores obtenidos para los mismos pulsos mediante autocorrelación de intensidad. La línea a trazos se muestra como referencia visual.

En los dos ejemplos se obtuvieron valores de duración del pulso con una exactitud del 20%, respecto de las medidas de autocorrelación. La diferencia respecto a medidas de autocorrelación depende fundamentalmente de las desviaciones del perfil temporal del pulso respecto al perfil considerado y de la dispersión del pulso en el material que compone el detector no lineal (Si y GaP). Es decir, la determinación de la duración del pulso está basada en la aproximación de que la forma particular de la función que describe el perfil temporal es siempre la misma que la del pulso resultante del filtrado espectral en el calibrado (por elemplo una gaussiana, una lorentzina, etc.), siendo la anchura de dicha función la única diferencia entre el pulso problema y el de referencia. Las desviaciones de este comportamiento son la causa fundamental del error en la determinación de la duración de los pulsos. La desviación estándar en las medidas (en 128 muestras) es del 5%.

En conclusión, el dispositivo y método propuestos proporcionan muy buenos resultados en el caso de pulsos cuyo perfil temporal muestra una estructura sencilla. Concretamente, el método y dispositivo presentan importantes ventajas frente al resto de soluciones en aquellos casos en los que no se requiere una información detallada del perfil de intensidad y la fase.

La invención no se limita obviamente a la(s) realización(es) específica(s) descrita(s), sino que abarca también cualquier variación que pueda ser considerada por cualquier experto en la materia (por ejemplo, con relación a la elección de materiales, dimensiones, componentes, configuración, etc.), dentro del alcance general de la invención como se define en las reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1.- Un método para la caracterización de un pulso ultracorto (10, 20, 30, 40), que comprende:

hacer llegar un pulso de referencia de duración conocida τ_{ref} a un primer detector (103, 203, 303', 403) que tiene una banda prohibida menor que la energía por fotón del pulso a caracterizar (10, 20, 30, 40) y a un segundo detector (102, 202, 302', 402) que tiene una banda prohibida mayor que la energía por fotón del pulso a caracterizar y menor que dos veces la energía por fotón del pulso a caracterizar,

obtener en dicho primer detector (103, 203, 303', 403) una señal monofotónica de referencia S_{α}^{ref} que tiene relación lineal con la intensidad del pulso de referencia y es proporcional a la duración τ_{ref} del pulso de referencia,

obtener en dicho segundo detector (102, 202, 302', 402) una señal bifotónica de referencia S_{β}^{ref} que tiene relación no lineal con la intensidad del pulso de referencia y es proporcional a la duración τ_{ref} del pulso de referencia,

hacer llegar a dicho primer detector (103, 203, 403) o a un tercer detector (303) que tiene una banda prohibida menor que la energía por fotón del pulso a caracterizar, y a dicho segundo detector (102, 202, 402) o a un cuarto detector (302) que tiene una banda prohibida mayor que la energía por fotón del pulso a caracterizar y menor que dos veces la energía por fotón del pulso a caracterizar, un pulso ultracorto a caracterizar (10, 20, 30, 40),

obtener en dicho primer detector (103, 203, 403) o en dicho tercer detector (303) una señal monofotónica S_{α} que tiene relación lineal con la intensidad del pulso ultracorto a caracterizar (10, 20, 30, 40) y es proporcional a la duración τ_{pulso} del pulso ultracorto a caracterizar (10, 20, 30, 40),

obtener en dicho segundo detector (102, 202, 402) o en dicho cuarto detector (302) una señal bifotónica S_{β} que tiene relación no lineal con la intensidad del pulso ultracorto a caracterizar y es proporcional a la duración τ_{pulso} del pulso ultracorto a caracterizar (10, 20, 30, 40),

obtener la duración τ_{pulso} del pulso a caracterizar (10, 20, 30, 40) a partir de dichas señales monofotónicas S_{α}^{ref}, S_{α}, de dichas señales bifotónicas S_{β}^{ref} , S_{β}, y de la duración conocida τ_{ref} del pulso de referencia.

2.- El método de la reivindicación 1, en el que dicho pulso de referencia de duración conocida τ_{ref} se obtiene haciendo pasar el pulso ultracorto a caracterizar (10, 20, 30, 40) a través de un filtro (104, 204, 304, 404) que tiene un ancho de banda menor que el del pulso ultracorto a caracterizar (10, 20, 30, 40).

3.- El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicho pulso de referencia de duración conocida τ_{ref} y dicho pulso ultracorto a caracterizar (10, 30, 40) se hacen llegar a los detectores correspondientes mediante un divisor de haz (101, 301, 401).

4.- El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 o 2, en el que dicho pulso de referencia de duración conocida τ_{ref} y dicho pulso ultracorto a caracterizar (20) se hacen llegar al detector (203) que tiene una banda prohibida menor que la energía por fotón del pulso a caracterizar después de transmitirse a través del detector (202) que tiene una banda prohibida mayor que la energía por fotón del pulso a caracterizar y menor que dos veces la energía por fotón del pulso a caracterizar.

5.- El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la duración τ_{pulso} del pulso a caracterizar se obtiene como sigue:

$$\tau_{pulso}=\tau_{ref}\,(S_{\beta}^{ref}/(S_{\alpha}^{ref})^2)/\,(S_{\beta}/(S_{\alpha})^2)$$

6.- El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la longitud de onda del pulso ultracorto a caracterizar (10, 20, 30, 40) varía en el rango de 200 a 3.000 nanómetros.

7.- Un dispositivo (1, 2, 4) para la caracterización de un pulso ultracorto (10, 20, 40), que comprende:

medios (104, 204, 404) para obtener un pulso de referencia de duración conocida τ_{ref},

un primer detector (103, 203, 403) que tiene una banda prohibida menor que la energía por fotón del pulso a caracterizar (10, 20, 40),

un segundo detector (102, 202, 402) que tiene una banda prohibida mayor que la energía por fotón del pulso a caracterizar y menor que dos veces la energía por fotón del pulso a caracterizar (10, 20, 40),

medios ópticos (101, 401, 407, 408) para hacer llegar un pulso o una réplica del mismo al primer detector (103, 203, 403) y al segundo detector (102, 202, 402), de forma que: cuando dicho pulso es el pulso de referencia de duración conocida τ_{ref}, en el primer detector (103, 203, 403) se obtiene una señal monofotónica S_{α}^{ref} con relación lineal con la intensidad del pulso de referencia y proporcional a la duración τ_{ref} del pulso de referencia, y en el segundo detector (102, 202, 402) se obtiene una señal bifotónica S_{β}^{ref} con relación no lineal con la intensidad del pulso de referencia y proporcional a la duración τ_{ref} del pulso de referencia; y cuando dicho pulso es el pulso a caracterizar (10, 20, 40), en el primer detector (103, 203, 403) se obtiene una señal monofotónica S_{α} con relación lineal con la intensidad del pulso a caracterizar (10, 20, 40) y proporcional a la duración τ_{pulso} del pulso a caracterizar, y en el segundo detector (102, 202, 402) se obtiene una señal bifotónica S_{β} con relación no lineal con la intensidad del pulso a caracterizar (10, 20, 40) y proporcional a la duración τ_{pulso} del pulso a caracterizar,

medios (105, 205, 405) para registrar dichas señales monofotónicas S_{α}^{ref}, S_{α} y dichas señales bifotónicas S_{β}^{ref} , S_{β},

medios (106, 206, 406) para obtener la duración τ_{pulso} del pulso a caracterizar a partir de dichas señales monofotónicas S_{α}^{ref}, S_{α}, de dichas señales bifotónicas S_{β}^{ref} , S_{β}, y de la duración conocida τ_{ref} del pulso de referencia.

8.- Un dispositivo (3) para la caracterización de un pulso ultracorto (30), que comprende:

medios ópticos (301) para dividir un pulso o una réplica del mismo en dos haces,

un primer detector (303') que tiene una banda prohibida menor que la energía por fotón del pulso a caracterizar (30) y un segundo detector (302') que tiene una banda prohibida mayor que la energía por fotón del pulso a caracterizar y menor que dos veces la energía por fotón del pulso a caracterizar (30), dispuestos para recibir

uno de dichos haces;

medios (304) para obtener un pulso de referencia de duración conocida τ_{ref}, dispuestos entre dichos medios ópticos (301) para dividir un pulso o una réplica del mismo en dos haces, y dichos primer y segundo detector (303', 302'), de forma que cuando dicho pulso de referencia de duración conocida τ_{ref}, llega al primer detector (303') se obtiene una señal monofotónica S_{α}^{ref} con relación lineal con la intensidad del pulso de referencia y proporcional a la duración τ_{ref} del pulso de referencia, y cuando dicho pulso de referencia de duración conocida τ_{ref}, llega al primer segundo detector (302') se obtiene una señal bifotónica S_{β}^{ref} con relación no lineal con la intensidad del pulso de referencia y proporcional a la duración τ_{ref} del pulso de referencia;

un tercer detector (303) que tiene una banda prohibida menor que la energía por fotón del pulso a caracterizar (30) y un cuarto detector (302) que tiene una banda prohibida mayor que la energía por fotón del pulso a caracterizar y menor que dos veces la energía por fotón del pulso a caracterizar (30), dispuestos para recibir el otro de dichos haces, de forma que cuando dicho pulso a caracterizar (30) llega al tercer fotodetector (303) se obtiene una señal monofotónica S_{α} con relación lineal con la intensidad del pulso a caracterizar (30) y proporcional a la duración τ_{pulso} del pulso a caracterizar, y cuando dicho pulso a caracterizar (30) llega al cuarto detector (302) se obtiene una señal bifotónica S_{β} con relación no lineal con la intensidad del pulso a caracterizar (30) y proporcional a la duración τ_{pulso} del pulso a caracterizar,

medios (305) para registrar dichas señales monofotónicas S_{α}^{ref}, S_{α} y dichas señales bifotónicas S_{β}^{ref} , S_{β},

medios (306) para obtener la duración τ_{pulso} del pulso a caracterizar a partir de dichas señales monofotónicas S_{α}^{ref}, S_{α}, de dichas señales bifotónicas S_{β}^{ref} , S_{β}, y de la duración conocida τ_{ref} del pulso de referencia.

9.- El dispositivo de cualquiera de las reivindicaciones 7 u 8, en el que dichos medios (104, 204, 304, 404) para obtener el pulso de referencia de duración conocida τ_{ref} es un filtro (104, 204, 304, 404) que tiene un ancho de banda menor que el del pulso ultracorto a caracterizar (10, 20, 30, 40).

10.- El dispositivo de cualquiera de las reivindicaciones 7 a 9, en el que la duración τ_{pulso} del pulso a caracterizar (10, 20, 30, 40) se obtiene como sigue:

$$\tau_{pulso}=\tau_{ref}\ (S_{\beta}^{ref}/(S_{\alpha}^{ref})^2)/\ (S_{\beta}/(S_{\alpha})^2)$$

11.- El dispositivo de cualquiera de las reivindicaciones 7 a 10, en el que dichos medios (105-405) para registrar dichas señales monofotónicas S_{α}^{ref}, S_{α} y dichas señales bifotónicas S_{β}^{ref} , S_{β}, son un osciloscopio o un convertidor analógico/digital.

12.- El dispositivo de cualquiera de las reivindicaciones 7 a 11, en el que dichos medios (106-406) para obtener la duración τ_{pulso} del pulso a caracterizar (10, 20, 30, 40) son un módulo de procesado de señales.

13.- El dispositivo de cualquiera de las reivindicaciones 7 a 12, en el que dichos medios ópticos (101, 401) son un divisor de haz que tiene una relación reflexión/transmisión tal que más del 50% de la luz es enviada al segundo detector (102, 402).

14.- El dispositivo de cualquiera de las reivindicaciones 7 a 13, en el que la longitud de onda del pulso ultracorto a caracterizar (10, 20, 30, 40) varía en el rango de 200 a 3.000 nanómetros.

15.- Un dispositivo medidor de energía o potencia que comprende un dispositivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 7 a 14.

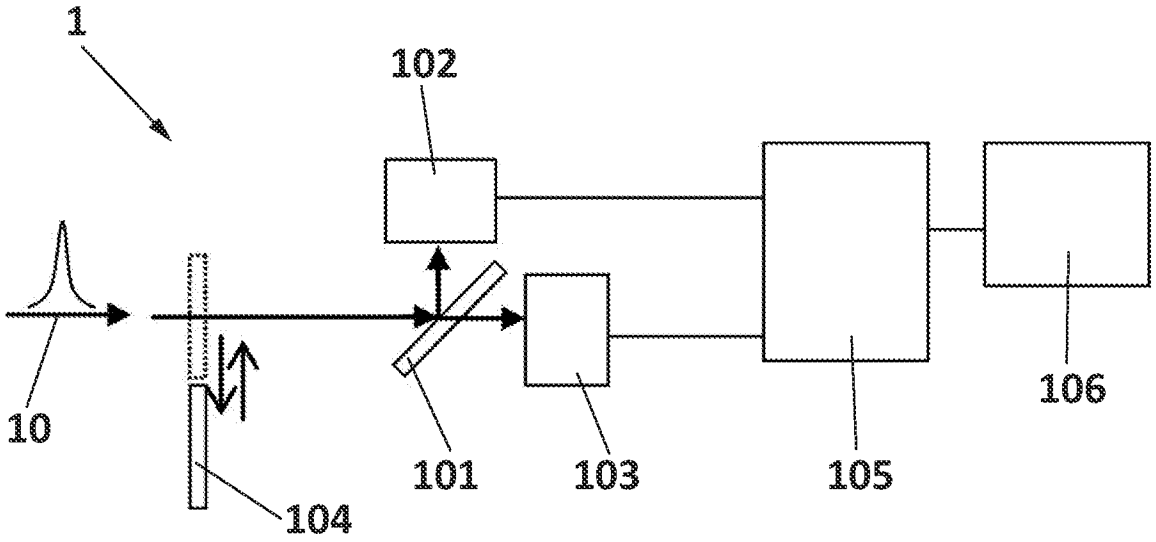

FIG. 1

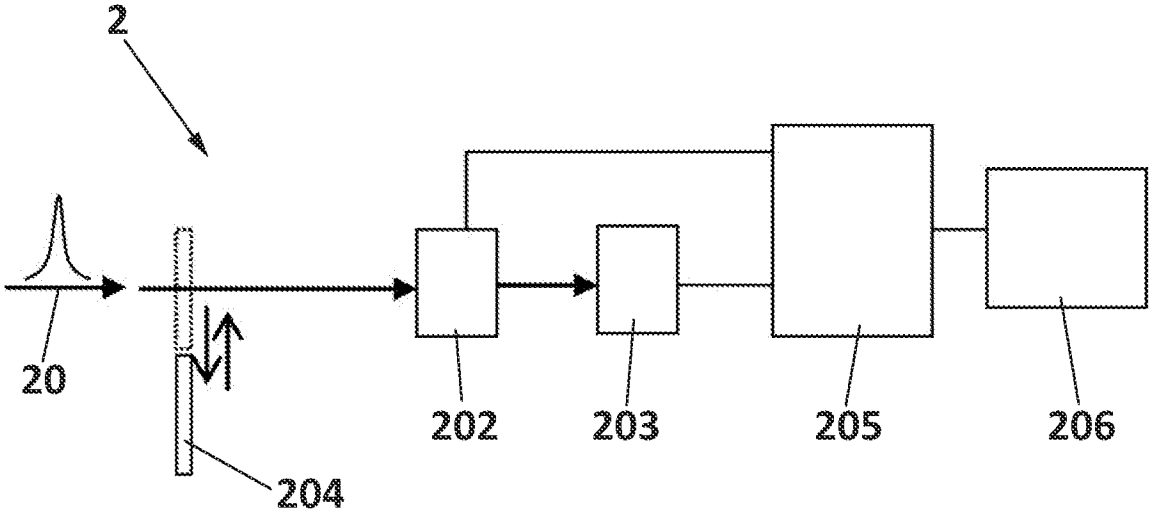

FIG. 2

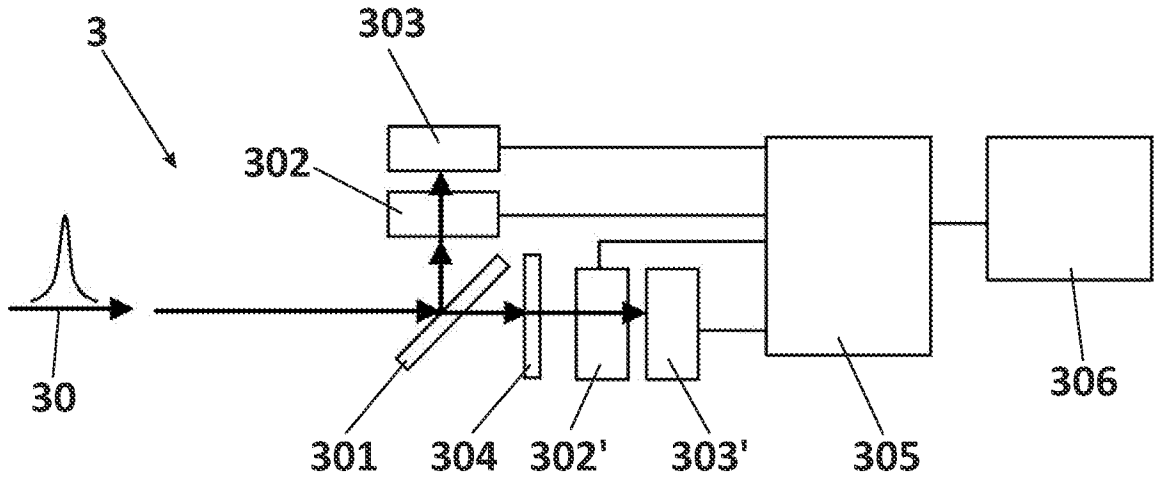
3
303
302
30
301
304
302'
303'
305
306

FIG. 3

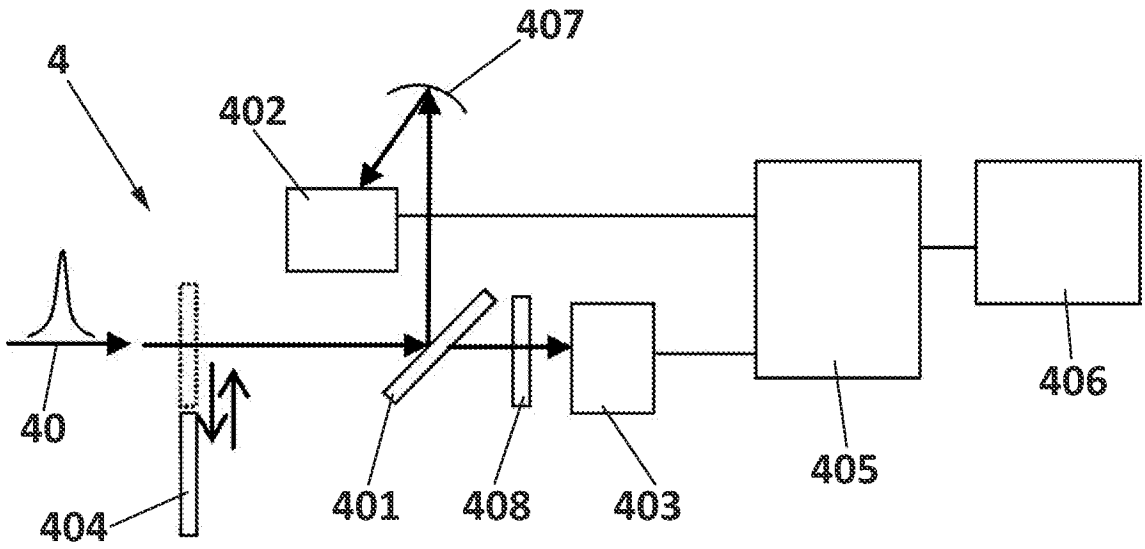
4
407
402
40
404
401
408
403
405
406

FIG. 4

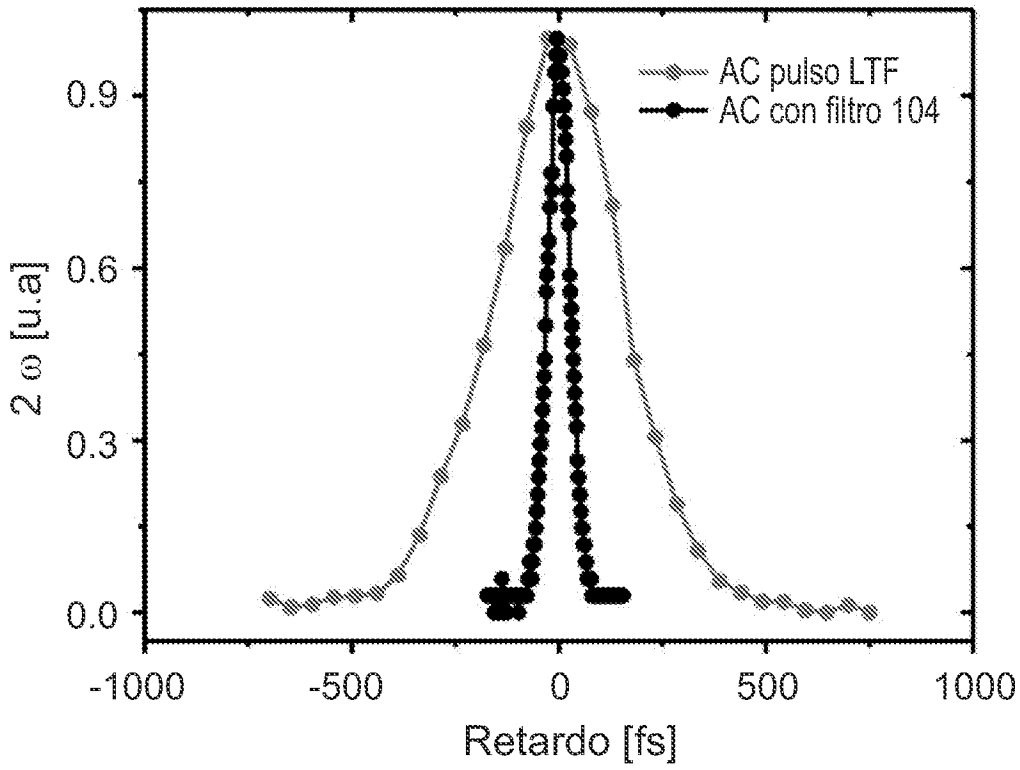
AC pulso LTF
AC con filtro 104
0.9
0.6
0.3
0.0
2 ω [u.a]
-1000
-500
0
500
1000
Retardo [fs]

FIG. 5

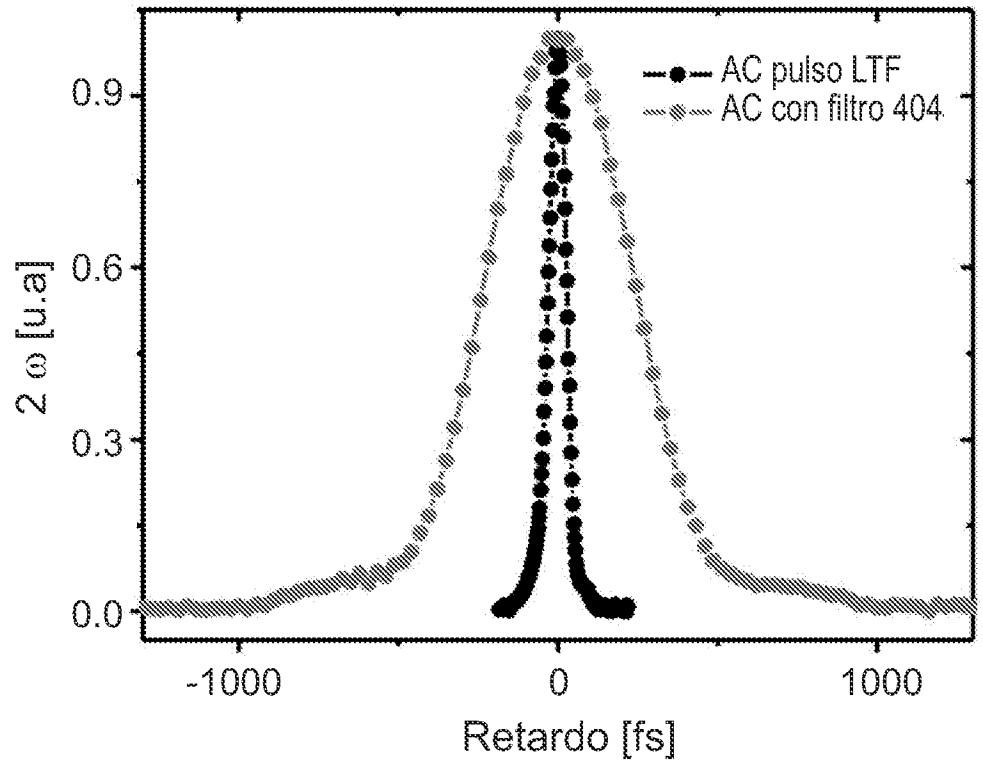
AC pulso LTF
AC con filtro 404
0.9
0.6
0.3
0.0
2 ω [u.a]
-1000
0
1000
Retardo [fs]

FIG. 6

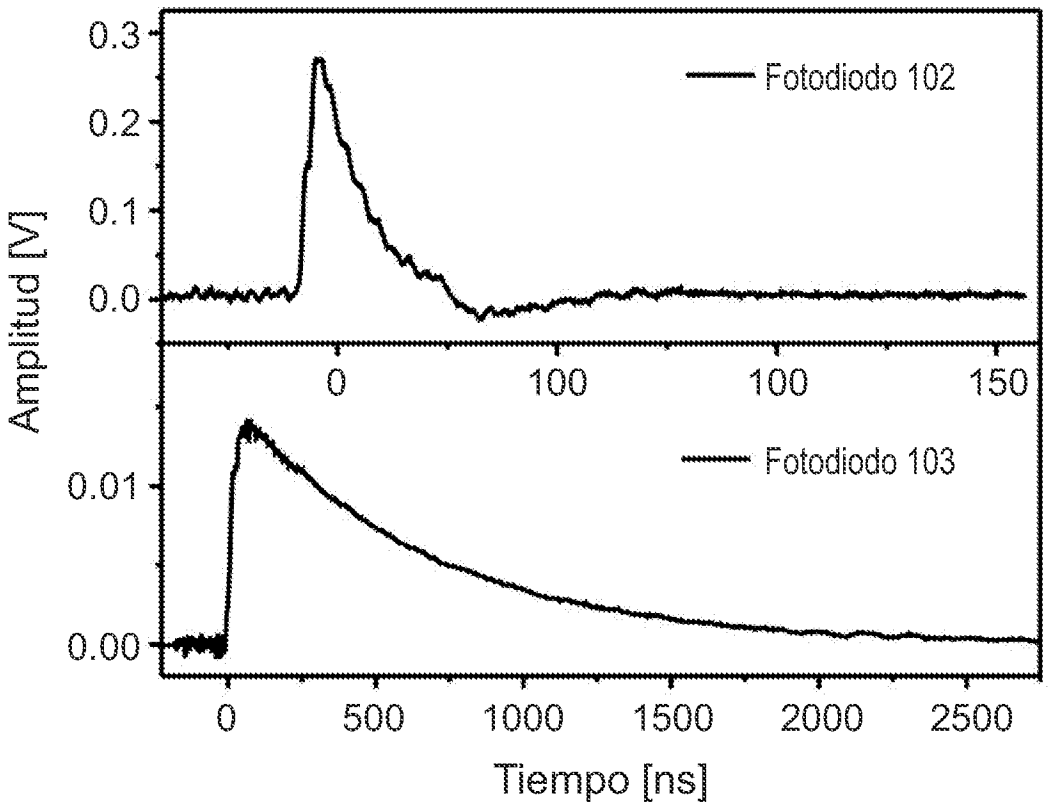
Fotodiodo 102
Fotodiodo 103
Amplitud [V]
0.3
0.2
0.1
0.0
0.01
0.00
0
100
100
150
0
500
1000
1500
2000
2500
Tiempo [ns]

FIG. 7

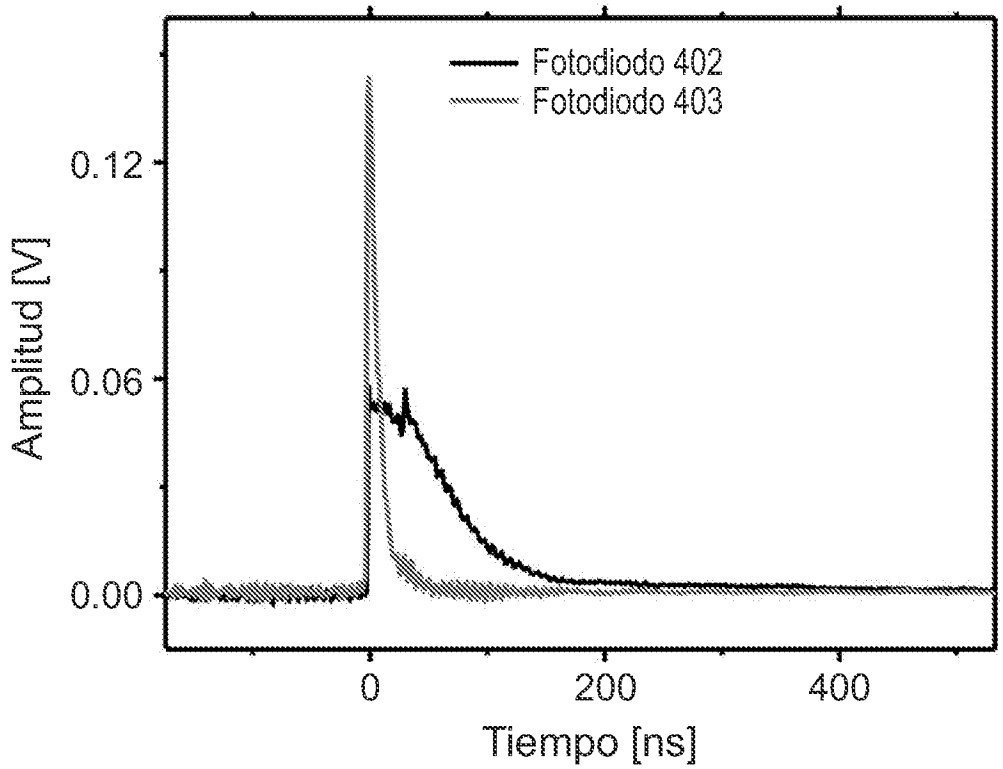
Fotodiodo 402
Fotodiodo 403
Amplitud [V]
0.12
0.06
0.00
0
200
400
Tiempo [ns]

FIG. 8

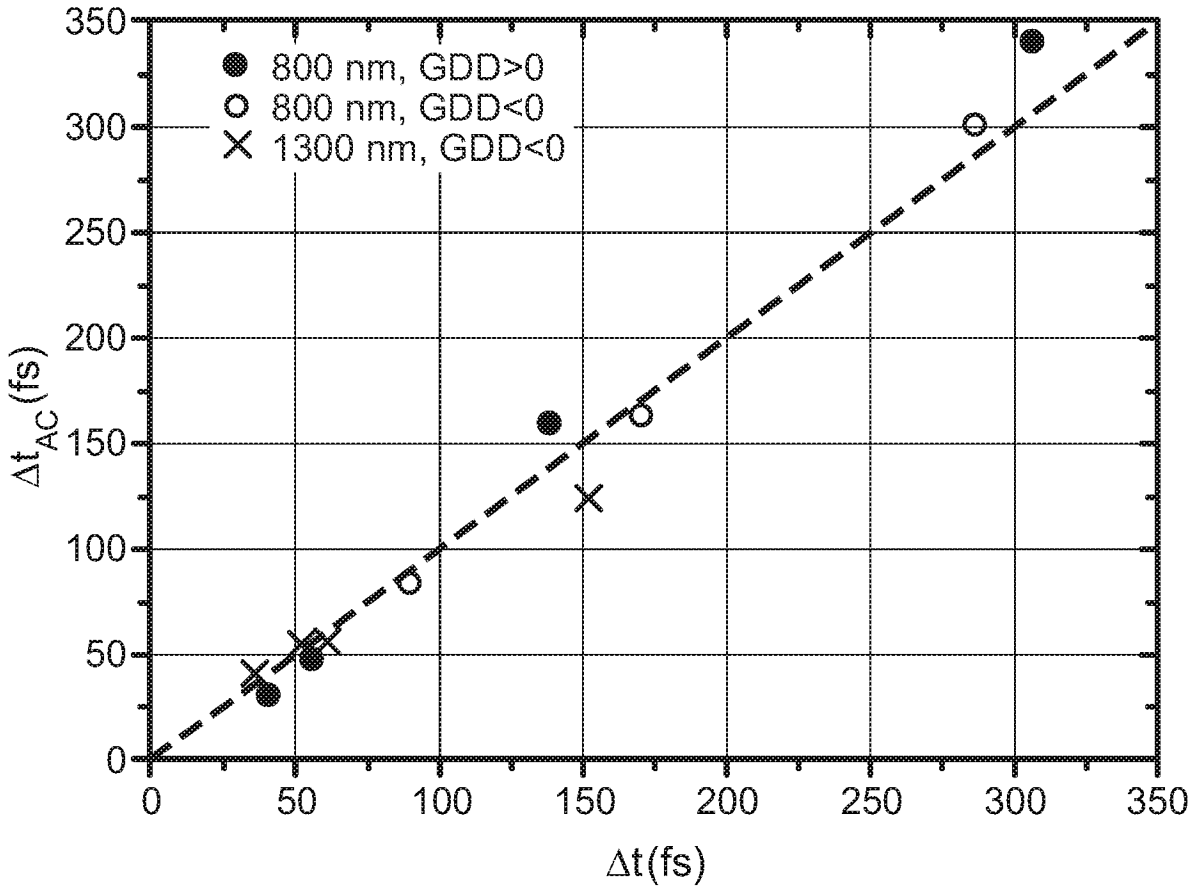
800 nm, GDD>0
800 nm, GDD<0
1300 nm, GDD<0
Δt_{AC}(fs)
Δt(fs)
0
50
100
150
200
250
300
350

FIG. 9

OFICINA ESPAÑOLA
DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(21) N.º solicitud: 201830207

(22) Fecha de presentación de la solicitud: 02.03.2018

(32) Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

(51) **Int. Cl. :** ***G01J11/00*** (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	(56) Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	WO 2006/103642 A2 (TRINITY COLLEGE OF DUBLIN) 05/10/2006, todo el documento.	1-15
A	CN 1317686 A (SHANGFEI INST OF OPTICAL FINE) 17/10/2001, todo el documento.	1-15
A	OBA, K. et al.: "Single-shot femtosecond/picosecond-range autocorrelator using tilted pulse front". Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1998, Vol. 3466, Páginas 185-195 [en línea],[recuperado el 23/10/2019], ISSN 0277-786X, DOI: 10.1117/12.326781.	-
A	EP 2075556 A1 (FASTLITE) 01/07/2009.	-

Categoría de los documentos citados
X: de particular relevancia
Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría
A: refleja el estado de la técnica
O: referido a divulgación no escrita
P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud
E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

☒ para todas las reivindicaciones ☐ para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe	Examinador	Página
25.01.2019	Ó. González Peñalba	1/2

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

G01J, H01S, G02B

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC, WPI, INSPEC