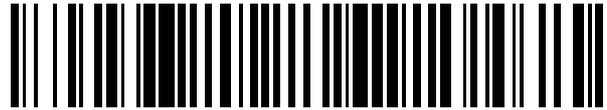


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 600 328**

51 Int. Cl.:

A61F 9/008

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **22.05.2014 PCT/EP2014/060565**

87 Fecha y número de publicación internacional: **26.11.2015 WO15176759**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.05.2014 E 14725700 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **07.09.2016 EP 2958531**

54 Título: **Técnica para ajustar parámetros de impulsos láser relacionados con la energía**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
08.02.2017

73 Titular/es:

**WAVELIGHT GMBH (100.0%)
Am Wolfsmantel 5
91058 Erlangen, DE**

72 Inventor/es:

**FOESEL, MATTHIAS;
DONITZKY, CHRISTOF;
VOGLER, KLAUS y
KITTELMANN, OLAF**

74 Agente/Representante:

CURELL AGUILÁ, Mireia

ES 2 600 328 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

Técnica para ajustar parámetros de impulsos láser relacionados con la energía.

5 **Campo técnico**

La presente divulgación se refiere al ajuste de parámetros de impulsos láser. En particular, se refiere a técnicas para ajustar parámetros de impulsos láser relacionados con la energía.

10 **Antecedentes**

Especialmente en entornos industriales y médicos, la radiación láser enfocada pulsada ha llegado a ser un medio importante para el procesamiento de material. En aplicaciones típicas de la radiación láser pulsada, los efectos electromagnéticos y/o térmicos de radiación láser absorbida se utilizan para cambiar o dislocar un material diana en una región irradiada del mismo con el fin de crear un corte en la diana o extirpar materia de la misma. El enfoque de la radiación incidente permite una intensidad local incrementada de la radiación y una zona de interacción confinada espacialmente más cercana con el material diana. Además, el uso de radiación pulsada en lugar de una radiación continua reduce el efecto de la acumulación de calor en el objeto tratado.

20 En aplicaciones de láser médico, por ejemplo en cirugía ocular asistida por láser, incluyendo, pero sin limitación, LASIK (queratomileusis por láser *in situ*), queratoplastia, extracción lenticular refractiva, etc., y también en otros tipos de procesamiento de material utilizando radiación láser, se desean usualmente un alcance claramente definido del tratamiento de láser y una baja transferencia total de energía al material tratado. Para esta finalidad, se ha sugerido el uso de impulsos láser ultracortos con una anchura de impulso en el intervalo por debajo de un picosegundo. 25 Convencionalmente, las duraciones de impulso utilizadas pueden estar en cualquier lugar entre 250 fs y 800 fs, por ejemplo. Al mismo tiempo, se intenta ajustar la energía de cada impulso singular en un valor tan pequeño como sea posible, es decir, próximo a una energía umbral para conseguir la dislocación o cualquier otro efecto deseado en la diana.

30 Cuando se ajustan las energías de impulso requeridas a diferentes duraciones de impulso para alcanzar un efecto deseado, se ha observado que, aunque los impulsos más cortos pueden presentar una potencia umbral más alta, el producto de la potencia umbral y la duración de impulso, es decir, la energía de impulso umbral, se reduce frecuentemente para duraciones de impulso más cortas. Sin embargo, se conoce a este respecto que para diversas aplicaciones existen anchuras de impulso características por debajo de las cuales puede observarse que la energía 35 de impulso umbral aumenta de nuevo. En ese caso, dado que se desea una transferencia mínima de energía, podrían determinarse longitudes de impulso ideales que pueden variar únicamente para diferentes aplicaciones y diferentes parámetros de haz o diana. Se han descrito técnicas correspondientes, por ejemplo, en el documento US 5 656 186 A.

40 Las características de impulso láser ideales dependen sustancialmente del material tratado y del efecto pretendido de un tratamiento por láser. Por ejemplo, en muchas aplicaciones prácticas, una modificación de la longitud de impulso puede llegar a ser deseable en conexión con un cambio en el proceso. Pueden surgir problemas cuando los ajustes de parámetros de impulso relacionados con la energía que se sintonizaron para ajustarse a una longitud de impulso particular pasan a ser subóptimos en términos de una transferencia de energía mínima cuando se cambia la 45 longitud de impulso. Al mismo tiempo, un usuario de un aparato de laser puede no ser capaz de identificar, por ejemplo durante el procesamiento, la energía de impulso ideal para una longitud de impulso elegida y puede estresar así indebidamente la diana exponiéndola a una radiación muy por encima del nivel de energía requerido.

50 Esto tiene de nuevo desventajas particulares en cirugía, especialmente en cirugía ocular por láser, cuando se realizan cortes debajo de una superficie del ojo. En efecto, en tales casos una energía de impulso excesiva conlleva frecuentemente burbujas de vapor indeseablemente grandes dentro del tejido ocular a consecuencia del tejido ocular evaporado; el tamaño de las burbujas puede ser sustancialmente mayor que el diámetro del foco del propio haz láser. Tales burbujas estresan el tejido ocular circundante y cambian las propiedades ópticas de la zona de operación, de tal manera que el propio proceso por láser o las técnicas ópticas relacionadas se ven afectadas 55 negativamente. Además, si en el escenario descrito se dirige una serie de impulsos en estrecha proximidad uno de otro, las burbujas producidas pueden conectarse formando celdas aún mayores y reforzar así sus efectos negativos. Aunque se conocen diversas técnicas para retirar tales volúmenes de gas, sería beneficioso que, para un intervalo de aplicaciones diferentes, su aparición pudiera mantenerse en un mínimo. Sin embargo, esto requiere una adaptación de parámetros de láser con un cambio de la aplicación.

60 Técnicas relacionadas con la configuración de parámetros de radiación para cirugía ocular por láser se han descrito, por ejemplo, en el documento WO 2013/152875 A1.

No obstante, es deseable una técnica para el ajuste facilitado de parámetros de impulsos láser.

65

Sumario

Según un primer aspecto, se describe un procedimiento para ajustar la energía de radiación láser enfocada pulsada de acuerdo con la reivindicación 1. El procedimiento comprende las etapas de establecer una relación entre una energía de impulso umbral requerida para provocar daños irreversibles en un material y una duración de impulso, permitiendo la relación obtener una energía de impulso umbral para cada una de entre una pluralidad de duraciones de impulso, incluyendo la pluralidad de duraciones de impulso una o más duraciones de impulso en un intervalo comprendido entre 200 fs y menos; para una duración de impulso dada en el intervalo comprendido entre 200 fs y menos, determinar una energía de impulso umbral asociada sobre la base de la relación establecida; y ajustar la energía de impulso de la radiación láser sobre la base de la energía de impulso umbral asociada determinada, definiendo la relación una energía de impulso umbral decreciente para una duración de impulso decreciente en el intervalo comprendido entre 200 fs y menos.

La relación puede representar una reducción de la energía de impulso umbral sustancialmente en función de la raíz cúbica de la duración de impulso. En ciertas formas de realización, la función es una función lineal de la raíz cúbica de la duración de impulso. Además o como alternativa, la relación puede definir la energía de impulso umbral como un valor como máximo de 0,35 μJ , por ejemplo como máximo 0,30 μJ o como máximo 0,25 μJ o como máximo 0,20 μJ o como máximo 0,15 μJ , para una duración de impulso de 300 fs o menos. Además o como alternativa, la relación puede definir la energía de impulso umbral como un valor en el intervalo comprendido entre 0,15 μJ y 0,30 μJ , por ejemplo en el intervalo comprendido entre 0,15 μJ y 0,20 μJ o desde 0,20 μJ a 0,25 μJ o de 0,25 μJ a 0,30 μJ o de 0,20 μJ a 0,30 μJ , para una duración de impulso de 200 fs. Además o como alternativa, la relación puede definir la energía de impulso umbral como un valor en el intervalo comprendido entre 0,05 μJ y 0,10 μJ , por ejemplo en el intervalo comprendido entre 0,05 μJ y 0,08 μJ o de 0,08 μJ a 0,10 μJ , para una duración de impulso de 10 fs.

La etapa de establecimiento puede incluir las etapas de irradiar, para cada una de entre una pluralidad de duraciones de impulso de referencia por encima de 200 fs, un objeto con una serie de impulsos de la radiación láser para crear un sitio de daño para cada impulso de la serie, en donde la energía de impulso se ajusta de manera diferente para cada impulso de la serie, determinar un tamaño de cada sitio de daño, determinar una energía de impulso umbral de referencia para cada una de entre la pluralidad de duraciones de impulso de referencia sobre la base de los tamaños determinados de los sitios de daño creados en la respectiva duración de impulso de referencia, y determinar la relación sobre la base de las energías de impulso umbral de referencia determinadas.

Cada energía de impulso umbral de referencia puede determinarse sobre la base de una extrapolación a tamaño cero de los tamaños determinados de los sitios de daño creados en la respectiva duración de impulso de referencia. Los tamaños pueden determinarse, por ejemplo, sobre la base de un diámetro, un área o un volumen de cada sitio de daño. La extrapolación puede basarse, por ejemplo, en un ajuste lineal, exponencial o polinómico o cualquier combinación de los mismos aplicado a los tamaños determinados.

Además o como alternativa, la determinación de la relación puede incluir determinar una aproximación lineal de la energía de impulso umbral en función de la duración de impulso.

La relación puede establecerse para un diámetro de foco de la radiación láser de no más de 10 μm o 7 μm o 5 μm , representando el diámetro de foco el diámetro de una parte de impulso que contiene un 86% de la energía de un impulso de la radiación.

El daño puede incluir una fotodislocación provocada por una desintegración óptica inducida por láser del material.

El procedimiento puede incluir la etapa de dirección de la radiación láser con la energía de impulso ajustada a un material no biológico o un material biológico para crear una incisión en el material. El material puede ser tejido ocular humano.

De acuerdo con un segundo aspecto, se describe un procedimiento de ajuste de la fluencia de radiación láser enfocada pulsada según la reivindicación 6. El procedimiento comprende las etapas de establecer una relación entre una fluencia de impulso umbral requerida para provocar daños irreversibles en un material y una duración de impulso, permitiendo la relación obtener una fluencia de impulso umbral para cada una de entre una pluralidad de duraciones de impulso, incluyendo la pluralidad de duraciones de impulso una o más duraciones de impulso en un intervalo comprendido entre 200 fs y menos; para una duración de impulso dada en el intervalo comprendido entre 200 fs y menos, determinar una fluencia de impulso umbral asociada sobre la base de la relación establecida; y ajustar la fluencia de impulso de la radiación láser sobre la base de la fluencia de impulso umbral asociada determinada, en donde la relación define una fluencia de impulso umbral decreciente para una duración de impulso decreciente en el intervalo comprendido entre 200 fs y menos.

La relación puede definir además la fluencia de impulso umbral como un valor de como máximo 1,80 Jcm^{-2} , por ejemplo como máximo 1,50 Jcm^{-2} o como máximo 1,30 Jcm^{-2} o como máximo 1,10 Jcm^{-2} o como máximo 0,90 Jcm^{-2} o como máximo 0,70 Jcm^{-2} o como máximo 0,50 Jcm^{-2} , para una duración de impulso de 300 fs o menos. Además o como alternativa, la relación puede definir la fluencia de impulso umbral como un valor en el intervalo comprendido

entre $0,80 \text{ Jcm}^{-2}$ y $1,50 \text{ Jcm}^{-2}$, por ejemplo en el intervalo comprendido entre $0,80 \text{ Jcm}^{-2}$ y $0,95 \text{ Jcm}^{-2}$ o entre $0,95 \text{ Jcm}^{-2}$ y $1,05 \text{ Jcm}^{-2}$ o de $1,05 \text{ Jcm}^{-2}$ a $1,30 \text{ Jcm}^{-2}$ o de $1,30 \text{ Jcm}^{-2}$ a $1,50 \text{ Jcm}^{-2}$, para una duración de impulso de 200 fs. Además o como alternativa, la relación puede definir la fluencia de impulso umbral como un valor en el intervalo comprendido entre $0,20 \text{ Jcm}^{-2}$ y $0,50 \text{ Jcm}^{-2}$, por ejemplo en el intervalo comprendido entre $0,20 \text{ Jcm}^{-2}$ y $0,35 \text{ Jcm}^{-2}$ o entre $0,35 \text{ Jcm}^{-2}$ y $0,50 \text{ Jcm}^{-2}$, para una duración de impulso de 10 fs.

De acuerdo con un tercer aspecto, se describe un aparato de láser, comprendiendo el aparato de láser una fuente de un haz de radiación láser pulsada ultracorta, un conjunto de componentes para guiar y conformar el haz en el tiempo y el espacio, una unidad de control que almacena datos representativos de una relación entre una energía de impulso umbral requerida para provocar daños irreversibles en un material y una duración de impulso, permitiendo la relación obtener una energía de impulso umbral para cada una de entre una pluralidad de duraciones de impulso, incluyendo la pluralidad de duraciones de impulso una o más duraciones de impulso en un intervalo comprendido entre 200 fs y menos, en donde la relación define una energía de impulso umbral decreciente para una duración de impulso decreciente en el intervalo comprendido entre 200 fs y menos, en donde la unidad de control está configurada para determinar, para una duración de impulso dada en el intervalo comprendido entre 200 fs y menos, una energía de impulso umbral asociada sobre la base de los datos almacenados y para determinar una energía de impulso diana para el haz sobre la base de la energía de impulso umbral asociada determinada.

La unidad de control puede estar configurada para producir una representación visual de la energía de impulso diana determinada sobre un dispositivo de salida. El dispositivo de salida puede ser un dispositivo remoto o puede estar integrado en el aparato de láser. Además o como alternativa, la unidad de control puede estar configurada para ajustar automáticamente la energía de impulsos diana determinada para el haz.

La relación puede representar una reducción de la energía de impulso umbral sustancialmente en función de la raíz cúbica de la duración de impulso. Además o como alternativa, la relación puede definir la energía de impulso umbral como un valor de como máximo $0,35 \mu\text{J}$, por ejemplo como máximo $0,30 \mu\text{J}$ o como máximo $0,25 \mu\text{J}$ o como máximo $0,20 \mu\text{J}$ o como máximo $0,15 \mu\text{J}$, para una duración de impulso de 300 fs o menos. Además o como alternativa, la relación puede definir la energía de impulso umbral como un valor en el intervalo comprendido entre $0,15 \mu\text{J}$ y $0,25 \mu\text{J}$, por ejemplo en el intervalo comprendido entre $0,18 \mu\text{J}$ y $0,22 \mu\text{J}$, para una duración de impulso de 200 fs. Además o como alternativa, la relación puede definir la energía de impulso umbral como un valor en el intervalo comprendido entre $0,05 \mu\text{J}$ y $0,10 \mu\text{J}$, por ejemplo en el intervalo comprendido entre $0,06 \mu\text{J}$ y $0,08 \mu\text{J}$, para una duración de impulso de 10 fs.

El haz puede ser un haz gaussiano con un parámetro M^2 de no más de 1,15 o 1,1.

Otros detalles, objetos y ventajas de la invención se pondrán de manifiesto a partir de la descripción y los dibujos siguientes.

Breve descripción de los dibujos

La invención se ilustra con referencia a los siguientes diagramas.

La figura 1 es una representación esquemática de una forma de realización de un procedimiento para determinar energías de impulso umbral para duraciones de impulso individuales según la presente invención;

La figura 2 es una representación esquemática de una forma de realización de un procedimiento para determinar energías de impulso umbral para un intervalo de duraciones de impulso según la presente invención;

La figura 3 es un diagrama de flujo de una forma de realización de un procedimiento para el ajuste de la energía de una radiación láser enfocada pulsada según la presente invención;

La figura 4 es un diagrama de flujo de una forma de realización alternativa de un procedimiento para el ajuste de la energía de una radiación láser enfocada pulsada según la presente invención; y

La figura 5 es una representación esquemática de una forma de realización de un aparato de láser según la presente invención.

Descripción detallada

La figura 1 ilustra esquemáticamente una forma de realización de un procedimiento para determinar, para duraciones de impulso particulares y para un material diana arbitrario, una energía de impulso umbral requerida para provocar daños irreversibles en el material diana. En el ejemplo de la figura 1, las duraciones de impulso T_L se eligen como 300 fs, 400 fs y 500 fs, pero el procedimiento descrito puede aplicarse también a cualquier otro conjunto de longitudes de impulso.

Como se muestra en el diagrama de la figura 1, para cualquier longitud de impulso elegida se producirá un daño de tamaño finito, $D_{\text{Daño}}$, en el material diana tan como como se alcance o se exceda una energía umbral dependiente de la longitud de impulso, E_{th} . El diagrama muestra además que, para cualquier longitud de impulso dada T_L , el tamaño $D_{\text{Daño}}$ de un sitio de daño provocado en el material diana aumentará con la energía de impulso. Mediante una comparación de las tres curvas puede verse que puede conseguirse también con menos energía, E_1 , una extensión de daño similar a la provocada por un impulso de 500 fs y con una energía E_2 si esa energía se concentra en un impulso más corto de 300 fs. Esto coincide con la suposición general de que, para efectos similares, el uso de impulsos más cortos permite una cantidad menor de energía transferida.

Puesto que a las respectivas energías de impulso umbral, $E_{\text{th},300}$, $E_{\text{th},400}$, $E_{\text{th},500}$, el daño que es provocado por un único impulso sería invisiblemente pequeño, es decir, $D_{\text{Daño}} = 0$, y/o consistiría solamente en cambios térmicos en el material, se determina la extensión del daño para energía más altas, E_1 , E_2 , en donde, para un intervalo de duraciones de impulso, pueden medirse convenientemente los tamaños de los sitios de daño. Como se indica por las líneas discontinuas en la figura 1, la extrapolación de esa dependencia para cada duración de impulso a un tamaño de daño de cero producirá seguidamente valores para las energías umbral correspondientes.

Aunque las curvas en la figura 1 sugieren una dependencia lineal del tamaño de daño respecto de la energía de impulso, la dependencia puede describirse frecuentemente mejor por una relación no lineal. La relación exacta depende, por ejemplo, de la cantidad que se elija para describir el tamaño del daño, ya sea por una longitud, un área o un volumen. Además, aunque en el ejemplo descrito sólo se han considerado efectos de impulso único, el procedimiento puede implicar igualmente una detección de tamaños de daño para números variables de impulsos aplicados a la misma localización (es decir, ráfagas de impulsos).

Aunque los procedimientos convencionales para determinar energías umbral dependen frecuentemente de los efectos secundarios que se producen en conexión con una desintegración óptica inducida por láser, por ejemplo con un rápido incremento de la emisión de plasma, el presente procedimiento mide directamente el efecto pretendido del daño irreversible en el material diana. De esta manera, podrían determinarse energías umbral, experimentalmente y para diferentes materiales diana, que difieran de los resultados obtenidos por otros procedimientos. Los experimentos sugieren en particular que puede lograrse una dislocación irreversible a energías umbral menores que las que se asumen generalmente. Sin embargo, esto no excluye la posibilidad de que también en el presente procedimiento el daño en el material diana sea provocado por lo menos parcialmente por una desintegración óptica inducida por láser.

La figura 2 ilustra, esquemáticamente y para características de impulso y material arbitrarias, un procedimiento para determinar una relación entre la energía de impulso umbral de daño y las duraciones de impulso en intervalos por debajo y por encima de 200 fs. En el intervalo por encima de 200 fs se han delineado las diferentes energías umbral, E_{th} , según la figura 1 para las correspondientes longitudes de impulso $T_L = 300$ fs, 400 fs y 500 fs. Como se ilustra por la curva continua en la figura 2, la interpolación permite que se establezca la relación deseada en ese intervalo.

Basándose en el supuesto de que para impulsos ultracortos la disrupción puede concebirse como un proceso principalmente dependiente de la intensidad, que no pone ningún límite inferior a la longitud de impulso y, así, a la energía umbral, se ha supuesto además que la relación expresada por la curva en la figura 2 puede partir del origen. En este caso, se asume que la energía de impulso umbral es sustancialmente una función de la raíz cúbica de la duración de impulso ($E_{\text{th}(\text{daño})} \sim T^{1/3}$). En conexión con los datos medidos, y como se ilustra por la curva discontinua en la figura 2, esto permite una extrapolación de la curva más allá del intervalo medido, también para duraciones de impulso que sean considerablemente más cortas que 200 fs.

La curva resultante muestra una reducción continua de la energía umbral incluso hacia longitudes de impulso muy cortas, y ésta se describe adecuadamente por una función de potencia de la longitud de impulso con un exponente menor que 1. La curva implica así que, si se pretende una baja transferencia de energía al material diana, las longitudes de impulso pueden reducirse por debajo del uso común, hasta el intervalo inferior a 200 fs, mientras que la energía de impulso umbral se reduce constantemente para duraciones de impulso decrecientes. Una vez que se ha establecido la relación descrita, éste puede utilizarse para ajustar la energía de impulso para diversas duraciones de impulso en el intervalo comprendido entre 200 fs y menos.

Además de lo anterior, o en una forma de realización simplificada que se baste sin el supuesto de que la curva pasa por el origen, la relación puede determinarse por lo menos parcialmente en el terreno de una aproximación lineal sobre la base de los datos medidos. Esta variante se ilustra a modo de ejemplo por la curva de sitios en la figura 2. Además, puesto que la relación descrita descansa sobre el supuesto de una dependencia de intensidad predominante, puede ser ventajoso en formas de realización alternativas del procedimiento descrito ignorar la energía de impulso a favor de otros parámetros de haz relacionados con la energía, tal como la fluencia por impulso.

La figura 3 es un diagrama de flujo de un ejemplo de forma de realización de un procedimiento 300 para el ajuste de energía de radiación láser enfocada pulsada según la presente invención. El procedimiento 300 puede implicar algunos o todos los procedimientos y resultados anteriormente descritos. En una primera etapa 310 se establece una relación entre una energía de impulso umbral de daño y una duración de impulso en un intervalo comprendido

entre 200 fs y menos. Esto puede realizarse, por ejemplo, por los procedimientos descritos en conexión con las figuras 1 y 2. Sobre la base de esa relación, y para una duración de impulso dada en el intervalo comprendido entre 200 fs y menos, se determina una energía de impulso umbral asociada, etapa 320. Seguidamente, en la etapa 330 se ajusta la energía de impulso de una radiación láser sobre la base de la energía de impulso umbral asociada determinada.

El procedimiento 300 permite así ajustar fácilmente la energía de la radiación láser a una longitud de impulso cambiada. De esta manera, llega a ser posible, por ejemplo, modificar, para procesos particulares, una longitud de impulso de un láser mientras se mantiene siempre una energía de impulso optimizada. Si la energía de impulso se ajusta a un valor mayor que la energía umbral determinada, el valor ajustado puede estar, en ciertas formas de realización, por ejemplo, en un intervalo comprendido entre 1,5 y 5 veces o entre 1,5 y 4 veces o entre 1,8 y 3,5 veces o entre 2 y 4 veces la energía umbral determinada. Según otras formas de realización, la energía de impulso de un aparato de láser utilizado para procesar un material puede ser por lo menos 1,3 veces o por lo menos 1,5 veces o por lo menos 1,9 veces o por lo menos 2,0 veces la energía umbral determinada. En cuanto a un límite superior, la energía de impulso ajustada puede ser no más de 5 veces o no más de 4,5 veces o no más de 4 veces o no más de 3,5 veces o no más de 3,0 o no más de 2,5 veces la energía umbral determinada. En ciertas formas de realización, la energía de impulso puede ajustarse en una cantidad absoluta predeterminada, por ejemplo 0,05 μJ , 0,10 μJ o 0,20 μJ o 0,30 μJ o 0,40 μJ , por encima de la energía umbral determinada. En cualquiera de tales casos, la información sobre la energía umbral para un intervalo de longitudes de impulso proporciona un medio relevante para optimizar la energía de impulso de una manera correspondiente.

La figura 4 muestra un diagrama de flujo de una forma de realización alternativa de un procedimiento 400 para ajustar la energía de una radiación láser enfocada pulsada según la presente invención. En el procedimiento 400 de la figura 4, la etapa 410 para establecer una relación entre una energía de impulso umbral de daño y una duración de impulso incluye una pluralidad de subetapas 412, 414, 416, 418. Análogamente al procedimiento 300 de la figura 3, una vez que se ha establecido la relación, ésta puede utilizarse para determinar, para una duración de impulso dada en el intervalo comprendido entre 200 fs y menos, una energía de impulso umbral asociada, etapa 420, y para ajustar la energía de impulso de una radiación láser sobre la base de la energía de impulso umbral asociada, etapa 430. Una vez que se ha ajustado la energía de impulso, la radiación láser puede dirigirse finalmente a un material diana para crear una incisión en el material, etapa 440.

En una primera etapa 412 un objeto o muestra del material para el que debe establecerse la relación descrita se irradia con diferentes energías de impulso y duraciones de impulso por encima de 200 fs de tal manera que se produzcan sitios de daño mensurable en el objeto. Se determina a continuación el tamaño de cada sitio de daño, etapa 414. Sobre la base de los tamaños determinados puede determinarse una energía de impulso umbral para cada una de las duraciones de impulso, etapa 416. Esto puede realizarse utilizando cualquiera de las técnicas descritas en conexión con la figura 1. Finalmente, sobre la base de las energías umbral determinadas se determina la relación entre una energía de impulso umbral de daño y una duración de impulso, etapa 418. Esto, de nuevo, puede hacerse utilizando cualquiera de las técnicas descritas en conexión con la figura 2.

Una relación exacta entre una energía de impulso umbral de daño y una duración de impulso dependerá también de otras numerosas condiciones. Estas condiciones incluyen, muy preeminentemente, características del material irradiado y otros parámetros del haz, tales como la longitud de onda del láser y los perfiles temporal y espacial de los impulsos láser. Sin embargo, sobre la base de datos experimentales ha resultado que, para aplicaciones relevantes, el exponente de la función de potencia que describe la relación buscada, como se muestra en la figura 2, varía principalmente entre 0,3 y 0,36. Por tanto, esto puede aproximarse prácticamente como una función de raíz cúbica de la duración de impulso.

Además, el procedimiento descrito 300, 400 produce resultados fiables para diferentes materiales de ensayo transparentes no biológicos y biológicos post mortem, tales como polimetilmetacrilato, PMMA, y tejido ocular animal, y para características de haz en los intervalos más relevantes para aplicaciones establecidas, por ejemplo cuando el diámetro del foco de láser, es decir, el diámetro de una sección transversal de haz que transmite aproximadamente el 86% de la energía de impulso, se elige menor de 10 micrómetros, por ejemplo menor de 8 micrómetros o menor de 6 micrómetros o menor de 4 micrómetros. Por ejemplo, para duraciones de impulso menores de 300 fs se determinaron energías umbral entre 0,05 y 0,35 microjulios. Dentro de ese intervalo se determinó que la energía umbral para una duración de impulso de 200 fs caía en un intervalo comprendido entre 0,15 y 0,30 microjulios, y, para una duración de impulso de 10 fs, en un intervalo comprendido entre 0,05 y 0,1 microjulios. Por tanto, puede esperarse que la misma dependencia de raíz cúbica característica de la energía de impulso umbral respecto de la duración de impulso y posiblemente también los mismos intervalos de energía se aplicarán en el caso de que el material diana sea tejido ocular humano.

Como se ha dicho antes, pueden materializarse formas de realización alternativas de los procedimientos 300, 400, en las que se consideren otros parámetros relacionados con la energía, por ejemplo, una fluencia por impulso, en lugar de la energía de impulso. En tales casos, la dependencia de raíz cúbica se aplica también de manera correspondiente. Por ejemplo, con las mismas características de foco y material que en el ejemplo previo, y si se aplica a una fluencia de impulso umbral, el procedimiento descrito 300, 400 produce, para longitudes de impulso

menores de 300 fs, una fluencia umbral entre 0,2 y 1,80 Jcm⁻². Más particularmente, se determinó que la fluencia umbral para una duración de impulso de 200 fs estaba en un intervalo comprendido entre 0,80 Jcm⁻² a 1,50 Jcm⁻², y, para una duración de impulso de 10 fs, en un intervalo comprendido entre 0,20 Jcm⁻² y 0,50 Jcm⁻².

5 La figura 5 muestra un ejemplo de forma de realización de un aparato de láser 500 según la presente invención. El aparato de láser 500 comprende una fuente de haz 510, un conjunto 520 de componentes para guiar y conformar el haz en el tiempo y el espacio, y una unidad de control 530. La unidad de control 530 puede comprender, o estar conectada a, una base de datos 535 de tal manera que la unidad de control 530 pueda acceder y procesar datos que se almacenan por la base de datos 535. El aparato de láser 500 puede incluir además un dispositivo de salida visual 540 y/o puede estar adaptado para entregar, por la unidad de control 530 y para una representación visual, una señal a un dispositivo de salida externo 540.

15 Para fines de simplicidad, la fuente de haz 510 y el conjunto 520 de componentes de guiado y conformación se muestran como dos entidades distintas en la figura 5. Sin embargo, en formas de realización alternativas los medios para conformar y guiar el haz pueden comprender una pluralidad de componentes disjuntos en el aparato de láser 500; a la inversa, también la fuente de haz 510 puede comprender medios para guiar y conformar un haz láser generado. Por tanto, deberá entenderse que la fuente de haz 510, junto con los medios de guiado y conformación 520, define cualquier disposición técnica conocida en la técnica que esté adaptada para proporcionar radiación láser enfocada pulsada ultracorta, en donde pueden controlarse por lo menos una longitud de impulso y una energía de impulso u otro parámetro relacionado con la energía, tal como una fluencia por impulso. A la vista de la mayoría de las aplicaciones relevantes, se prefiere además que el haz láser proporcionado sea un haz gaussiano con un parámetro M² de no más de 1,15.

25 La unidad de control 530 puede almacenar y procesar datos que son representativos de una relación entre una duración de impulso y una energía de impulso umbral de daño o un umbral de daño para otro parámetro de impulso relacionado con la energía, tal como una fluencia umbral, según la presente invención. Para esa finalidad de almacenamiento de datos, la unidad de control 530, como se muestra en la figura 5, comprende un dispositivo de almacenamiento 535 que sirve para alojar una base de datos. En formas de realización alternativas la base de datos 535 puede disponerse externamente a la unidad de control 530, siempre y cuando una conexión funcional entre la unidad de control 530 y la base de datos 535 permita que la unidad de control 530 lea y procese datos que están almacenados por la base de datos 535. Sobre la base de esos datos almacenados, la unidad de control 530 está configurada para determinar, para una duración de impulso dada menor que 200 fs, una energía de impulso umbral asociada y, además, para determinar una energía para impulsos en un haz diana sobre la base del valor umbral determinado.

35 Como se muestra en la figura 5, la unidad de control 530 está configurada además para entregar al dispositivo de salida 540 una señal que indique la energía de impulso diana determinada. Una visualización gráfica de la energía de impulso diana determinada permite así que un usuario del aparato de láser ajuste una energía de impulso según la información visualizada y dependiente de la longitud de impulso elegida. Alternativamente, la unidad de control 530 puede estar adaptada para ajustar automáticamente la energía de impulso determinada. Esto puede conseguirse, por ejemplo, por conexiones de control entre la unidad de control y la fuente de haz 510 y/o el conjunto 520 de medios de guiado y conformación de haz. Esto permitirá que un usuario del aparato de láser 500 modifique arbitrariamente la longitud de impulso, mientras que el aparato de láser 500 proporcionará automáticamente una energía de impulso correspondiente.

45

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento (300; 400) para ajustar una energía de radiación láser enfocada pulsada, comprendiendo el procedimiento las etapas siguientes:

- 5 - establecer (310; 410) una relación entre una energía de impulso umbral requerida para provocar daños irreversibles en un tejido ocular y una duración de impulso, permitiendo la relación obtener una energía de impulso umbral para cada una de entre una pluralidad de duraciones de impulso, incluyendo la pluralidad de duraciones de impulso una o más duraciones de impulso en un intervalo comprendido entre 200 fs y un valor menor;
- 10 - para una duración de impulso dada en el intervalo comprendido entre 200 fs y un valor menor, determinar (320; 420) una energía de impulso umbral asociada sobre la base de la relación establecida; y
- 15 - ajustar (330; 430) la energía de impulso de la radiación láser sobre la base de la energía de impulso umbral asociada determinada,

en el que la relación define una energía de impulso umbral decreciente para una duración de impulso decreciente en el intervalo comprendido entre 200 fs y menos, caracterizado por que la etapa de establecimiento (410) incluye:

- 20 - irradiar (412), para cada una de entre una pluralidad de duraciones de impulso de referencia por encima de 200 fs, un material no biológico o un material biológico postmortem con una serie de impulsos de la radiación láser para crear un sitio de daño para cada impulso de la serie, siendo la energía de impulso ajustada de manera diferente para cada impulso de la serie;
- 25 - determinar (414) un tamaño de cada sitio de daño;
- 30 - determinar (416) una energía de impulso umbral de referencia para cada una de entre la pluralidad de duraciones de impulso de referencia sobre la base de los tamaños determinados de los sitios de daño creados en la respectiva duración de impulso de referencia; y
- determinar (418) la relación sobre la base de las energías de impulso umbral de referencia determinadas.

35 2. Procedimiento (300; 400) según la reivindicación 1, en el que la relación representa una reducción de la energía de impulso umbral sustancialmente en función de la raíz cúbica de la duración de impulso.

40 3. Procedimiento (300; 400) según la reivindicación 1 o 2, en el que la relación define la energía de impulso umbral como un valor de como máximo 0,35 μJ para una duración de impulso de 300 fs o menos, y/o en el que la relación define la energía de impulso umbral como un valor en el intervalo comprendido entre 0,15 μJ y 0,30 μJ para una duración de impulso de 200 fs, y/o en el que la relación define la energía de impulso umbral como un valor en el intervalo comprendido entre 0,05 μJ y 0,10 μJ para una duración de impulso de 10 fs.

45 4. Procedimiento (400) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que cada energía de impulso umbral de referencia se determina sobre la base de una extrapolación a tamaño cero de los tamaños determinados de los sitios de daño creados en la respectiva duración de impulso de referencia.

50 5. Procedimiento (400) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que determinar (418) la relación incluye determinar una aproximación lineal de la energía de impulso umbral en función de la duración de impulso.

6. Procedimiento de ajuste de la fluencia de una radiación láser enfocada pulsada, comprendiendo el procedimiento las etapas siguientes:

- 55 - establecer una relación entre una fluencia de impulso umbral requerida para provocar daños irreversibles en el tejido ocular y una duración de impulso, permitiendo la relación obtener una fluencia de impulso umbral para cada una de entre una pluralidad de duraciones de impulso, incluyendo la pluralidad de duraciones de impulso una o más duraciones de impulso en un intervalo comprendido entre 200 fs y un valor menor;
- 60 - para una duración de impulso dada en el intervalo comprendido entre 200 fs y un valor menor, determinar una fluencia de impulso umbral asociada sobre la base de la relación establecida; y
- ajustar la fluencia de impulso de la radiación láser sobre la base de la fluencia de impulso umbral asociada,

65 en el que la relación define una fluencia de impulso umbral decreciente para una duración de impulso decreciente en el intervalo comprendido entre 200 fs y un valor menor,

caracterizado por que la etapa de establecimiento incluye:

- 5 - irradiar, para cada una de entre una pluralidad de duraciones de impulso de referencia por encima de 200 fs, un material no biológico o un material biológico postmortem con una serie de impulsos de la radiación láser para crear un sitio de daño para cada impulso de la serie, siendo la fluencia de impulso ajustada de manera diferente para cada impulso de la serie;
- determinar un tamaño de cada sitio de daño;
- 10 - determinar una fluencia de impulso umbral de referencia para cada una de entre la pluralidad de duraciones de impulso de referencia sobre la base de los tamaños determinados de los sitios de daño creados a la respectiva duración de impulso de referencia; y
- 15 - determinar la relación sobre la base de las fluencias de impulso umbral de referencia determinadas.

7. Procedimiento (300; 400) según la reivindicación 6, en el que la relación define la fluencia de impulso umbral como un valor de como máximo $1,80 \text{ Jcm}^{-2}$ para una duración de impulso de 300 fs o menos, y/o en el que la relación define la fluencia de impulso umbral como un valor en el intervalo comprendido entre $0,80 \text{ Jcm}^{-2}$ y $1,50 \text{ Jcm}^{-2}$ para una duración de impulso de 200 fs, y/o en el que la relación define la fluencia de impulso umbral como un valor en el intervalo comprendido entre $0,20 \text{ Jcm}^{-2}$ y $0,50 \text{ Jcm}^{-2}$ para una duración de impulso de 10 fs.

8. Procedimiento (300; 400) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en el que la relación se establece para un diámetro del foco de la radiación láser de no más de $10 \mu\text{m}$ o $7 \mu\text{m}$ o $5 \mu\text{m}$, en el que el diámetro del foco representa el diámetro de una parte de impulso que contiene un 86% de la energía de un impulso de la radiación.

9. Aparato de láser (500), que comprende:

- una fuente (510) de un haz de radiación láser pulsada ultracorta;
- 30 - un conjunto (520) de componentes para guiar y conformar el haz en el tiempo y el espacio;
- una unidad de control (530, 535) que almacena unos datos representativos de una relación entre una energía de impulso umbral requerida para provocar daños irreversibles en un tejido ocular y una duración de impulso, permitiendo la relación obtener una energía de impulso umbral para cada una de entre una pluralidad de duraciones de impulso, incluyendo la pluralidad de duraciones de impulso una o más duraciones de impulso en un intervalo comprendido entre 200 fs y un valor menor, definiendo la relación una energía de impulso umbral decreciente para una duración de impulso decreciente en el intervalo comprendido entre 200 fs y un valor menor, y estando la unidad de control configurada para determinar, para una duración de impulso dada en el intervalo comprendido entre 200 fs y un valor menor, una energía de impulso umbral asociada sobre la base de los datos almacenados y para determinar una energía de impulso diana para el haz sobre la base de la energía de impulso umbral asociada determinada,

caracterizado por que la relación define la energía de impulso umbral como un valor de como máximo $0,35 \mu\text{J}$ para una duración de impulso de 300 fs o menos, y definiendo la relación la energía de impulso umbral como un valor en el intervalo comprendido entre $0,15 \mu\text{J}$ y $0,30 \mu\text{J}$ para una duración de impulso de 200 fs, y definiendo la relación la energía de impulso umbral como un valor en el intervalo comprendido entre $0,05 \mu\text{J}$ y $0,1 \mu\text{J}$ para una duración de impulso de 10 fs.

10. Aparato de láser (500) según la reivindicación 9, en el que la unidad de control (530) está configurada para producir una representación visual de la energía de impulso diana determinada en un dispositivo de salida (540).

11. Aparato de láser (500) según la reivindicación 9 o 10, en el que la unidad de control (530) está configurada para ajustar automáticamente la energía de impulso diana determinada para el haz.

12. Aparato de láser (500) según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 11, en el que la relación representa una reducción de la energía de impulso umbral sustancialmente en función de la raíz cúbica de la duración de impulso.

13. Aparato de láser (500) según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 12, en el que el haz es un haz gaussiano que presenta un parámetro M^2 de no más de 1,15 o 1,1.

60

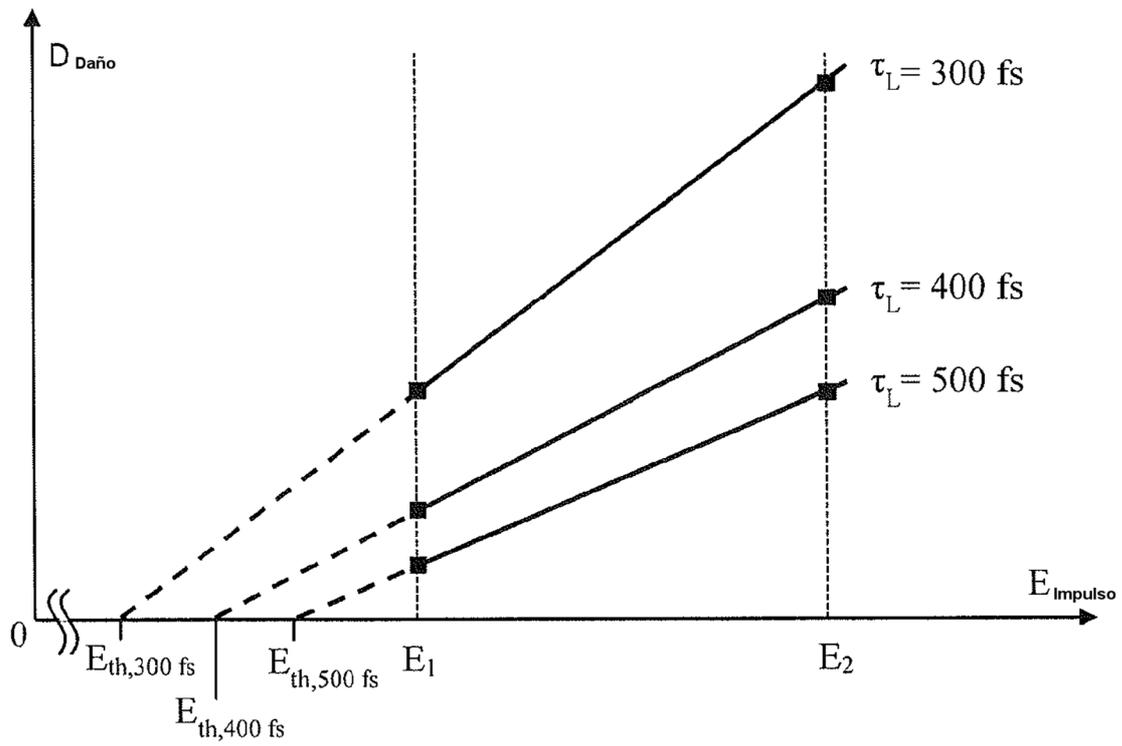


Fig. 1

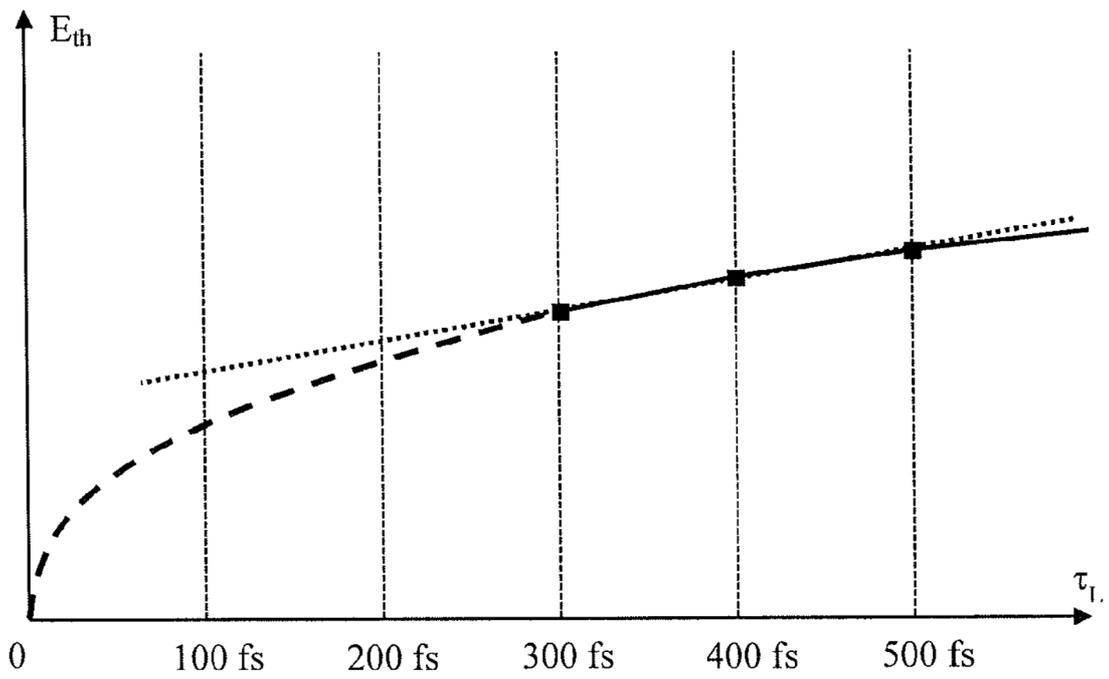


Fig. 2

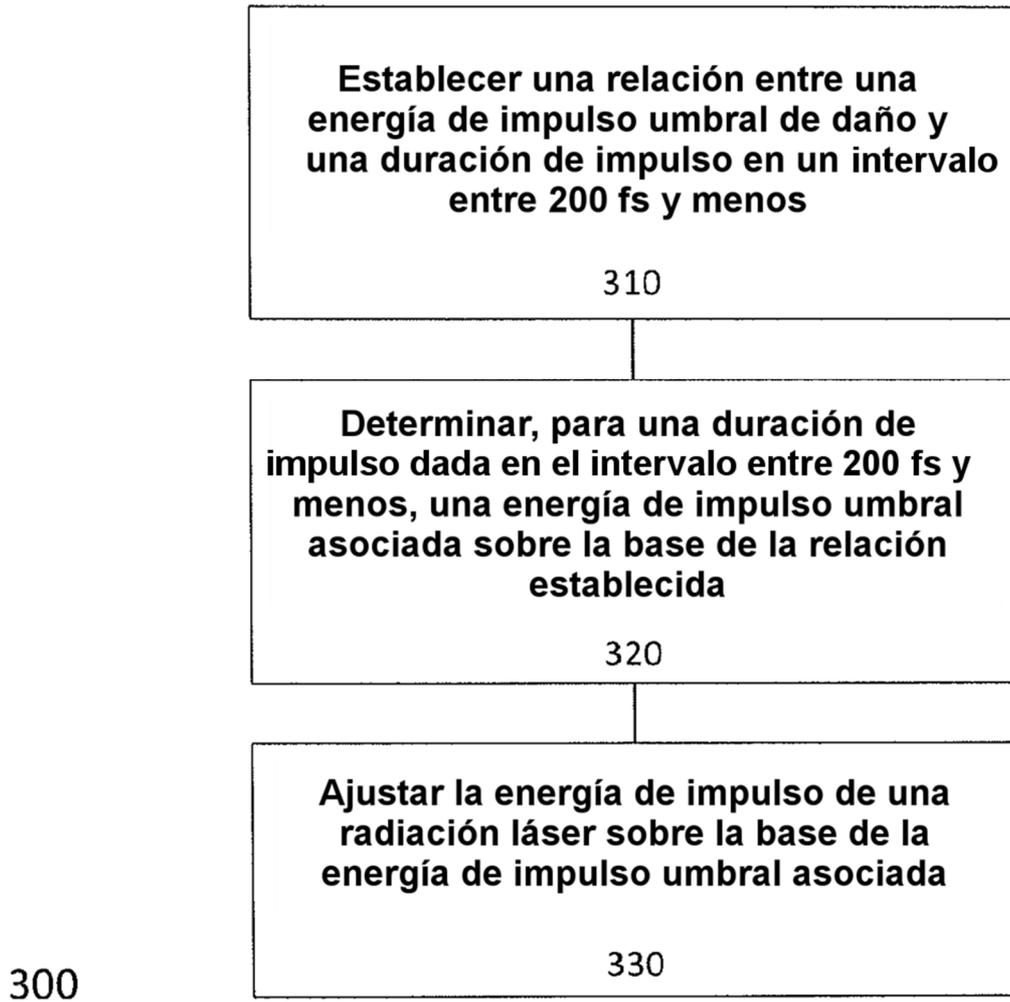


Fig. 3

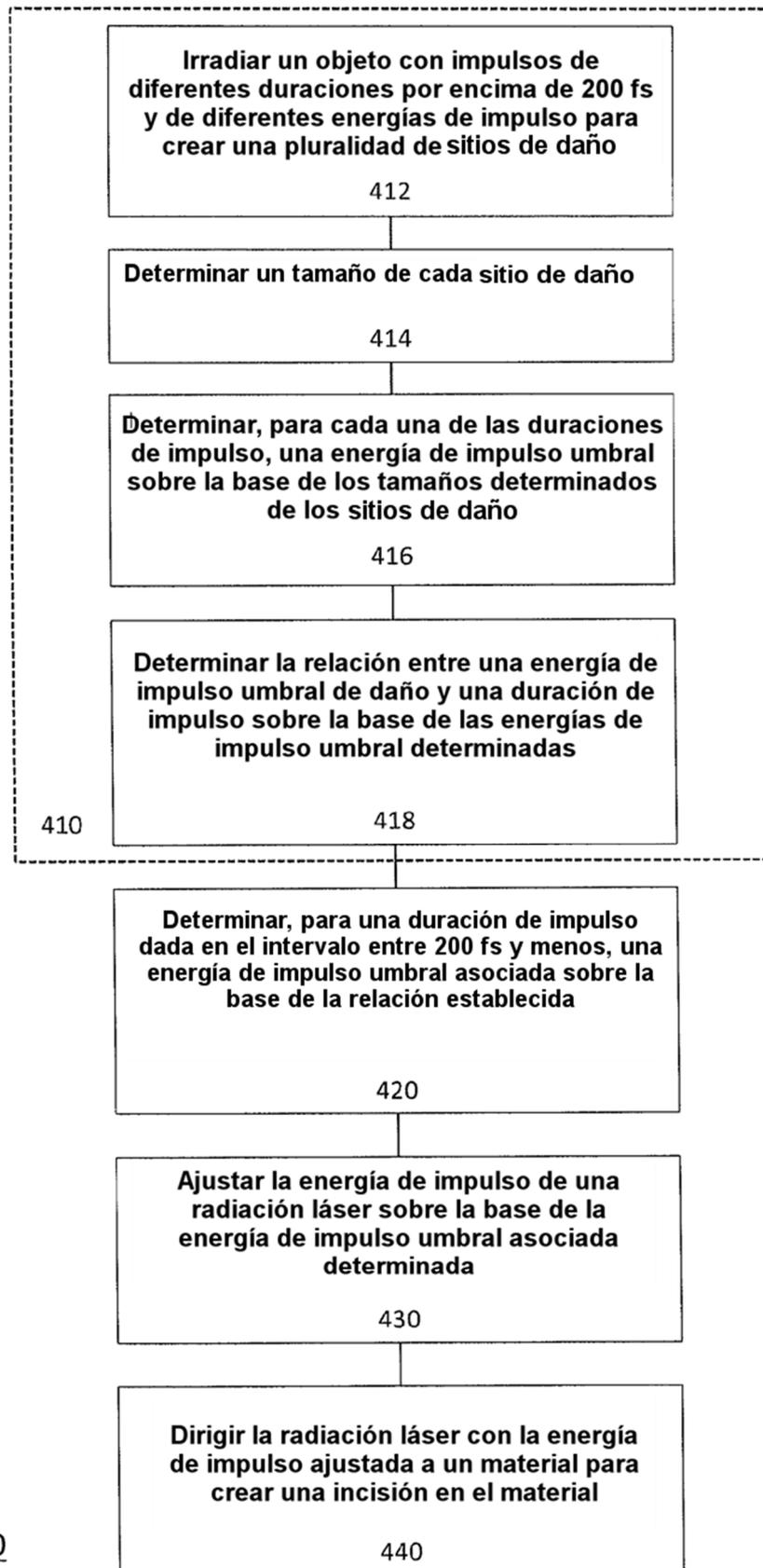


Fig. 4

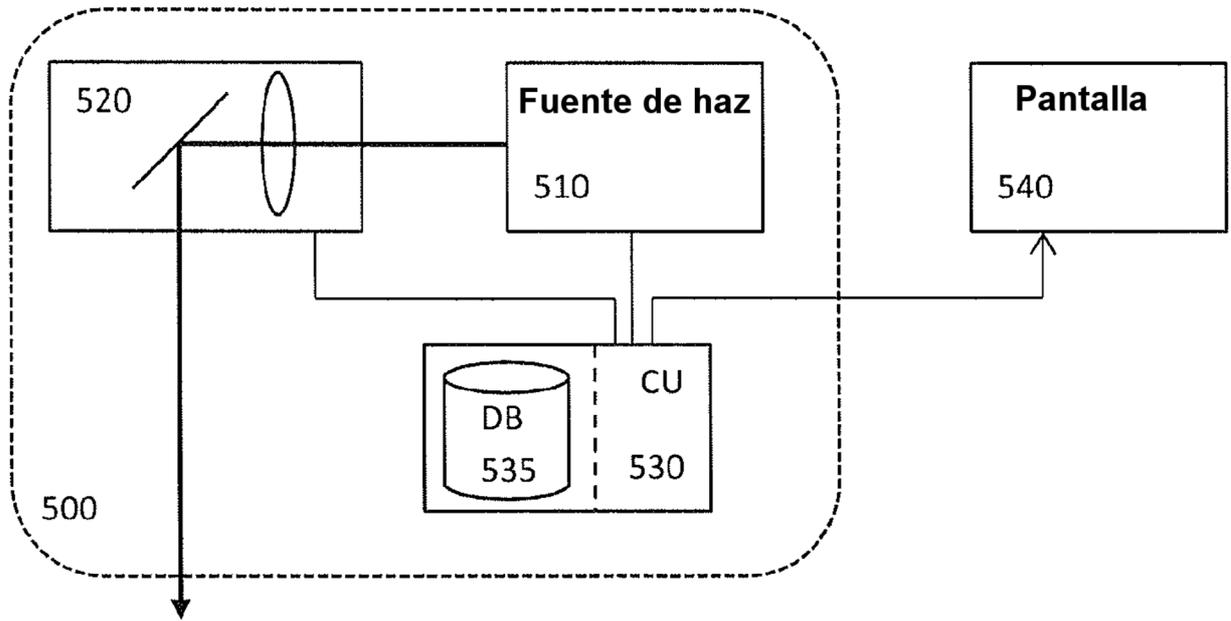


Fig. 5