

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 618 254**

51 Int. Cl.:

A61F 9/008 (2006.01)

A61B 18/20 (2006.01)

B23K 26/00 (2014.01)

B23K 26/067 (2006.01)

B29C 59/16 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **07.05.2014 PCT/EP2014/059306**

87 Fecha y número de publicación internacional: **12.11.2015 WO2015169349**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.05.2014 E 14721882 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.12.2016 EP 2953596**

54 Título: **Técnica para el tratamiento multi-pulsos fotodisruptivo de un material**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
21.06.2017

73 Titular/es:
**WAVELIGHT GMBH (100.0%)
Am Wolfsmantel 5
91058 Erlangen, DE**

72 Inventor/es:
**VOGLER, KLAUS y
DONITZKY, CHRISTOF**

74 Agente/Representante:
LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 618 254 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 el tratamiento multi-pulsos fotodisruptivo de un material

5 La presente descripción concierne a una técnica para el tratamiento fotodisruptivo de un material utilizando radiación láser pulsada y enfocada. Más específicamente, la presente descripción pertenece a un esquema multi-pulsos para generar una foto-disrupción en un material. En determinadas realizaciones, el material es un material biológico que incluye, pero no se limita a tejido ocular humano. En otras realizaciones, el material es un material no biológico.

10 La foto-disrupción se refiere a un tipo específico de interacción entre un material y radiación láser incidente en el material. La foto-disrupción procede de un fenómeno físico denominado descomposición óptica inducida por láser (abreviada LIOB) y está asociada con efectos mecánicos que incluyen, pero no se limitan a cavitación que resulta de la formación de plasma en el material que está siendo irradiado con radiación láser. La foto-disrupción ha demostrado ser un efecto de lesión útil para crear incisiones en un material transparente (es decir, transparente a la radiación láser). Mientras que la LIOB por sí misma puede estar confinada sustancialmente a la zona focal de la radiación láser, burbujas de cavitación inducidas por LIOB pueden expandir la zona de lesión más allá del volumen focal, corrompiendo las incisiones hechas en el material.

15 La foto-disrupción puede verse como un proceso impulsado por la intensidad, en el que la radiación láser incidente debería exceder de un umbral de intensidad específico para provocar una foto-disrupción en el material. El umbral de la foto-disrupción puede depender de factores tales como el tipo de material y la longitud de onda y la anchura del pulso de la radiación láser. La cantidad total de energía necesaria para desencadenar una foto-disrupción se puede aplicar al material como un solo paquete o pulso de radiación (es decir, aplicación de un solo pulso) o a través de una serie temporal de paquetes separados, o pulsos, de radiación (es decir, aplicación multi-pulso). La serie puede consistir en cualquier número de pulsos más de uno, y los pulsos de la serie pueden tener energías iguales o diferentes. Se ha observado que para una aplicación multi-pulso, la energía de cada uno de los pulsos de la serie puede ser menor que la energía umbral aplicable para una aplicación de un solo pulso (dado el mismo material, longitud de onda, anchura de pulso y dimensiones del foco), sin embargo el efecto acumulativo de la serie de pulsos puede provocar, no obstante, una foto-disrupción. Se ha observado también que la dimensión lesiva de la cavitación puede ser menor para una aplicación multi-pulso que para una aplicación de un solo pulso, minimizando así la zona de la lesión y potenciando la precisión de corte.

20 Una aplicación de doble pulso convencional comprende la generación de una foto-disrupción en cada uno de una pluralidad de sitios de procesamiento en un material biológico, en donde sólo uno de los sitios de procesamiento es irradiado con radiación láser poco a poco. Cada uno de los sitios de procesamiento es irradiado con un pre-pulso de energía relativamente baja y un subsiguiente pulso principal de energía relativamente mayor, en donde el pulso principal provoca que se produzca la foto-disrupción en el sitio de procesamiento que está siendo irradiado. Después de la creación de una foto-disrupción en uno de los sitios de procesamiento, un escáner mueve un punto focal de la radiación láser a un siguiente sitio de procesamiento para aplicar otro par de un pre-pulso y uno principal. El controlador que se da a conocer en el documento WO 99/53992 A2 no está configurado para mover el haz a lo largo de la posición diana en la dirección de la línea constituida por los máximos de intensidad local del haz difractado.

25 De acuerdo con realizaciones de la presente invención, la reivindicación 15 comprende un método para procesar por láser un material no biológico.

30 Por lo tanto, el método implementa una aplicación multi-pulsos en que la posición diana es irradiada con radiación procedente de una pluralidad de pulsos temporalmente compensados del haz láser. Debido a la difracción del haz, la distribución de la intensidad transversal de cada uno de los pulsos exhibe una pluralidad (es decir, dos o más) de máximos locales. Una foto-disrupción se genera irradiando el material de una manera solapante en el espacio con una pluralidad de segmentos de pulsos transversales, perteneciendo cada uno de ellos a un pulso temporalmente diferente de la radiación láser e incluyendo cada uno sólo uno de una pluralidad de máximos de intensidad locales del haz difractado. Al segmento transversal también se le alude en esta memoria como una porción en sección transversal del haz difractado. Para al menos un subconjunto del conjunto de pulsos requeridos para lograr una foto-disrupción, el haz debe ser desplazado transversalmente, es decir, perpendicularmente a la dirección de propagación del haz entre pulsos sucesivos del subconjunto. Al desplazar (o escanear) de esta manera el haz difractado en una dirección transversal, cada uno de los pulsos de al menos el subconjunto irradia la posición diana con una porción en sección transversal del haz que incluye un máximo de intensidad local diferente respectivo. En determinadas realizaciones, el haz es escaneado transversalmente entre todos los pulsos del conjunto, de manera que un máximo de intensidad local abarcado por uno de los segmentos transversales no es abarcado por el otro de los segmentos transversales.

- En virtud de difractar un haz inicialmente limitado en la difracción, se puede crear una pluralidad de haces parciales, estando cada uno asociado con un máximo de intensidad local diferente de la pluralidad de máximos de intensidad local del haz difractado. En determinadas realizaciones, los haces parciales pueden tener focos situados en un plano x-y común en un sistema de coordenadas x-y-z, en donde z se refiere a la dirección de propagación del haz difractado y x-y se refiere a direcciones ortogonales a la dirección z. En este caso, el escaneo transversal del haz difractado permite crear una incisión extendida bidimensionalmente que tiene un plano de corte que es paralelo con respecto a un plano x-y. En otras realizaciones, al menos algunos de los haces parciales pueden tener focos situados en diferentes planos x-y, es decir, tienen diferentes localizaciones z. Más específicamente, determinadas realizaciones pueden proporcionar una distribución bidimensional en filas y columnas de los focos de los haces parciales, en donde la posición z de los focos varía cuando se observa en una dirección de la fila de la distribución, pero permanece constante o sustancialmente constante cuando se observa en una dirección de la columna de la distribución. El escaneo del haz difractado transversalmente en la dirección de la columna permite crear entonces una incisión extendida bidimensionalmente que tiene un plano de corte que está inclinado con respecto a un plano x-y.
- Debido al haz difractado, se puede irradiar poco a poco una pluralidad de posiciones diana con segmentos de pulsos respectivos transversales, en donde cada uno de los segmentos de pulsos transversales incluye un máximo de intensidad local diferente del haz. De esta manera, el material se puede procesar simultáneamente en una pluralidad de posiciones diana (o sitios de procesamiento) de una manera temporalmente solapante. Esto permite una reducción del tiempo de procesamiento global, necesario para la compleción del tratamiento deseado del material, sin incrementar la velocidad del escaneo transversal del haz láser.
- En determinadas realizaciones, las porciones en sección transversal del haz de al menos el subconjunto son distintas (es decir, no solapantes) cuando se proyectan sobre un plano transversal (es decir, transversal a la dirección de propagación del haz láser). En otras realizaciones, al menos un par de porciones en sección transversal del haz de al menos el subconjunto son parcialmente solapantes cuando se proyectan sobre un plano transversal.
- En realizaciones preferidas, el haz difractado tiene una distribución puntual de máximos de intensidad local en una zona focal del haz. La distribución puntual puede ser una distribución unidimensional o una distribución bidimensional. La distribución unidimensional es una de una distribución regular e irregular a lo largo de una curva, en donde la curva tiene una de curvatura cero y curvatura no cero. A una zona de curvatura cero también se la puede aludir como una línea recta, mientras que una curva de curvatura no cero no es recta, es decir, está curvada. Curvas a modo de ejemplo de curvatura no cero son una espiral y un círculo. En una distribución regular, máximos de intensidad local adyacentes tienen una distancia sustancialmente igual uno de otro, mientras que en una distribución irregular la distancia no es igual para todos los máximos de intensidad local de la distribución. La distribución bidimensional puede ser una de una distribución de matriz y una distribución basada en círculos concéntricos. En determinadas realizaciones, la distribución de la matriz es regular, es decir, los máximos de intensidad local tienen una distancia mutua sustancialmente igual en direcciones de filas y columnas de la matriz. En otras realizaciones, la distribución de la matriz es irregular, es decir, la distancia entre máximos de intensidad local adyacentes, ya sea en la dirección de las filas o en la dirección de las columnas, no es igual en todas las partes de la matriz.
- De acuerdo con la invención, al menos un subconjunto de los máximos de intensidad local del haz difractado se distribuye a lo largo de una línea, en donde el método comprende mover el haz difractado a lo largo de la posición diana en la dirección de la línea. La línea puede ser una línea recta o puede ser una línea curvada, p. ej., una línea curvada circularmente o una línea curvada en espiral. Una línea curvada puede ser útil, p. ej., para la creación de una incisión anular o parcialmente anular (tal como, p. ej., un corte lateral en un tratamiento LASIK, en donde el corte lateral se extiende desde un corte del lecho del estroma a la superficie anterior de la córnea). En una realización, los máximos de intensidad local del haz difractado están todos distribuidos a lo largo de una sola línea. En una realización alternativa, el patrón de distribución de los máximos de intensidad local del haz difractado define una pluralidad de líneas mutuamente paralelas, p. ej., en una forma de matriz o en forma de una pluralidad de círculos concéntricos, en donde cada una de las líneas comprende un subconjunto de máximos de intensidad local, en donde cada uno de los subconjuntos puede incluir el mismo número o un número diferente de máximos de intensidad local.
- En determinadas realizaciones, los máximos de intensidad local distribuidos en línea, es decir, los máximos de intensidad local que están distribuidos a lo largo de una y la misma línea, están dispuestos con el fin de aumentar el valor de la intensidad, en donde un máximo de intensidad local más pequeño es incidente en la posición diana en un primer instante y un máximo de intensidad local mayor es incidente en la posición diana en un segundo instante que es después del primer instante. De esta manera, la posición diana es irradiada con una serie tempo-

ral de paquetes de radiación, en donde la intensidad de los paquetes de radiación aumenta a medida que los paquetes de radiación de la serie llegan uno tras otro.

5 De acuerdo con realizaciones, los máximos de intensidad local distribuidos en línea son todos de diferentes valores de intensidad, de manera que en la serie temporal de paquetes de irradiación que son incidentes en la posición diana, la intensidad aumenta de paquete a paquete.

De acuerdo con otras realizaciones, los máximos de intensidad local distribuidos en línea incluyen dos o más máximos de un valor de intensidad sustancialmente igual. En determinadas realizaciones, los máximos de intensidad local distribuidos a lo largo de una y la misma línea del patrón de distribución son todos de un valor de intensidad sustancialmente igual.

10 Independientemente de la distribución de intensidad particular entre los máximos de intensidad local que están dispuestos a lo largo de una línea del patrón de distribución, la radiación de un pulso último en el tiempo en el conjunto de pulsos de radiación provoca en determinadas realizaciones que se sobrepase un umbral para el deterioro fotodisruptivo del material. En otras palabras, el que la posición diana sea irradiada con un conjunto de pulsos de radiación de intensidades mutuamente diferentes o que sea irradiada con un conjunto de pulsos de radiación de intensidad sustancialmente igual, el pulso último en el tiempo del conjunto tiene en este tipo de realizaciones el efecto de que se sobrepasa un umbral multi-pulsos para la creación de una foto-disrupción en el material.

20 Se ha indicado antes que el umbral de intensidad de un solo pulso para lograr el deterioro a través de la foto-disrupción puede ser diferente para diferentes materiales. De acuerdo con realizaciones de la presente invención, cada uno de los máximos de intensidad local del haz difractado se encuentra por debajo de un umbral de intensidad de un solo pulso para una descomposición óptica inducida por láser en tejido ocular humano. El umbral de intensidad de un solo pulso es un umbral aplicable para la generación de una LIOB y una foto-disrupción resultante en tejido ocular humano a través de un solo pulso de radiación láser. El tejido ocular humano incluye, pero no se limita a uno de tejido de la córnea, tejido de la lente y tejido retinal.

25 De acuerdo con realizaciones, el método de la presente invención comprende: mover el haz difractado a través del material transversalmente con respecto a una dirección de propagación del haz de acuerdo con un patrón de disparo predeterminado para suministrar un pulso de radiación láser al material en relación con cada una de las posiciones de disparo, en donde una distancia entre posiciones de disparo adyacentes se corresponde con una distancia entre máximos de intensidad local adyacentes de la distribución puntual.

30 En determinadas realizaciones, la radiación de un pulso último en el tiempo en el conjunto de pulsos de radiación tiene la intensidad más alta entre el conjunto. Específicamente, la radiación de un pulso último en el tiempo en el conjunto puede comprender un máximo de intensidad global del haz difractado.

35 El conjunto de pulsos de radiación utilizado para irradiar el material para generar una foto-disrupción en la posición diana puede consistir en cualquier número de pulsos mayor que uno. Por ejemplo, el conjunto puede consistir en dos, tres, cuatro o cinco pulsos. En otras realizaciones, el conjunto puede comprender un número de pulsos sustancialmente mayor. Por ejemplo, el número de pulsos puede estar en el intervalo de dos dígitos o tres dígitos.

Los pulsos de la radiación láser pueden tener una anchura de pulso dentro del intervalo de attosegundos, femtosegundos, picosegundos o nanosegundos.

40 En determinadas realizaciones, máximos de intensidad local adyacentes en el espacio del haz difractado tienen una distancia de no más de 20 μm o 15 μm o 10 μm u 8 μm o 6 μm o 5 μm o 4 μm o 3 μm o 2 μm en una zona focal del haz.

En otro aspecto, realizaciones de la presente invención proporcionan un aparato para el procesamiento por láser de un material, tal como se indica en la reivindicación 1.

45 El dispositivo de difracción puede incluir una rejilla óptica para difractar el haz de láser. Adicional o alternativamente, el dispositivo de difracción puede incluir una o más de otras estructuras de difracción que incluyen, pero no se limitan a una abertura, un bisturí, un modulador acústico óptico y un holograma (p. ej., un holograma bidimensional o tridimensional). En determinadas realizaciones, el dispositivo de difracción incluye un DOE (Elemento Óptico Difractivo) que tiene una superficie micro-estructurada para su función óptica.

50 Todavía otro aspecto de la presente descripción proporciona un producto de programa de ordenador que comprende instrucciones que, cuando son ejecutadas por un controlador de un aparato láser, determinan que se lleve a cabo el método anterior.

Aún otro aspecto de la presente invención proporciona un medio de almacenamiento de información (tal como un disco, una tarjeta de almacenamiento o una tarjeta de memoria) en el que se almacena el producto de programa de ordenador anterior.

5 La invención se explicará con mayor detalle en lo que sigue con referencia a los dibujos que se acompañan, en los que:

La Fig. 1 ilustra esquemáticamente componentes de un aparato para el tratamiento quirúrgico por láser de un material diana de acuerdo con una realización; y

La Fig. 2 ilustra esquemáticamente relaciones a modo de ejemplo entre posiciones diana para la irradiación por láser y una distribución de la intensidad transversal de un haz láser enfocado emitido por el aparato de la Fig. 1.

10 La Fig. 1 muestra un aparato láser para procesar un material diana utilizando radiación láser enfocada y pulsada, designándose el aparato generalmente con 10. En una situación a modo de ejemplo, que se ilustra en la Fig. 1, el aparato 10 se utiliza para realizar una cirugía por láser de un ojo humano 12 como puede ser necesario en el caso de una visión defectuosa o una enfermedad del ojo 12. Por ejemplo, el aparato 10 puede utilizarse para crear una o más incisiones en tejido de la córnea, tejido de la lente, bandas vítreas o tejido retinal del ojo 12.

15 Incisiones de este tipo pueden ser necesarias como parte de una operación destinada a mejorar la visión de un paciente a través de una corrección refractiva. Un ejemplo de un tipo de cirugía ocular refractiva es LASIK (queratomileusis in-situ por láser). Huelga decir que la aplicabilidad del aparato 10 no está limitada a generar incisiones en el ojo 12 en el curso de una operación de LASIK. Utilizando el aparato 10 se pueden realizar igualmente otros tipos de operación quirúrgica del ojo que requieren la creación de una o más incisiones en el ojo 12, incluyendo

20 estos otros tipos de operación, pero no limitados a extracción de la lentícula intracorneal, queratoplastia (lamelar o penetrante), cirugía de cataratas, etc. Además de ello, el aparato 10 puede ser útil para el procesamiento por láser de un material no vivo tal como en una aplicación foto-litográfica.

El aparato 10 puede ser particularmente útil para aplicaciones que requieren una o más secuencias de foto-disrupciones yuxtapuestas a generar en el material diana en cada uno de uno o más planos x-y en un sistema de

25 coordenadas x-y-z del aparato de láser 10. Tal como se utiliza en esta memoria, z se refiere a la dirección longitudinal del haz y x-y se refiere a un plano transversal con respecto a la dirección de propagación del haz. La secuencia puede ser una secuencia rectilínea o una secuencia curvada. Una secuencia rectilínea de foto-disrupciones se puede crear cada vez que el foco del haz se mueve a lo largo de una porción de trayectoria rectilínea de una trayectoria de escaneo sinuosa que incluye una pluralidad de porciones de trayectoria rectilínea

30 que se extienden en paralelo entre sí, en donde las adyacentes de las porciones de trayectoria rectilíneas están conectadas terminalmente por una porción de trayectoria inversa. Un patrón de escaneo sinuoso puede ser útil para generar una incisión que se extiende bidimensionalmente en un plano x-y, p. ej., un corte de lecho para un colgajo de LASIK, en donde el corte del lecho define un lecho estromal del colgajo. A la inversa, una secuencia curvada de foto-disrupciones se puede crear a medida que el foco del haz es movido en un plano x-y a lo largo de

35 una línea curvada, p. ej., una línea circular, según sea necesario para generar en una operación de LASIK una incisión lateral que se extiende desde un borde periférico del corte del lecho a la superficie anterior de la córnea.

El aparato 10 comprende una fuente de láser 14, un expansor 16 del haz, un dispositivo de difracción 18, un escáner 20, un objetivo de enfoque 22, una unidad de control 24, una memoria 26 y un programa de control 28 almacenado en la memoria 26 para controlar el funcionamiento de la unidad de control 24.

40 La superficie del láser genera un haz de láser 30 limitado en la difracción, constituido por un tren regular (es decir, periódico) de pulsos 32 de radiación láser. Como se puede ver por la ilustración esquemática de varios de los pulsos de láser 32, en la Fig. 1 la distribución de la intensidad espacial (es decir, transversal) de los pulsos de láser 32 es gaussiana o próxima a gaussiana e incluye un solo máximo de intensidad. La longitud de onda de la radiación láser generada por la fuente de láser 14 se selecciona adecuadamente para asegurar que la radiación

45 emitida por el aparato 10 pueda penetrar lo suficientemente en el tejido diana del ojo 12 (o, más en general, el material diana) para alcanzar una LIOB y una foto-disrupción resultante a través de una aplicación multi-pulsos. Para el tratamiento del ojo humano, por ejemplo, la longitud de onda del láser puede estar en un intervalo infrarrojo entre aproximadamente 700 nm y aproximadamente 1900 nm, o puede estar en un intervalo ultravioleta por encima de aproximadamente 300 nm. Otras longitudes de onda pueden ser adecuadas para el tratamiento de

50 otros materiales. La anchura de pulso de los pulsos generados por la fuente de láser 14 puede estar en cualquier punto entre attosegundos y nanosegundos y, por ejemplo, en un intervalo de femtosegundos de dos dígitos o tres dígitos.

El expansor 16 del haz expande el haz de láser 30 de una manera generalmente conocida per se, utilizando, p. ej., un telescopio de Galilei que comprende una lente divergente y una lente convergente dispuestas aguas abajo

de la lente divergente con respecto a la dirección de propagación del haz de láser 30. La salida del haz de láser expandido procedente del expansor 16 del haz se designa con 30_{exp} en la Fig. 1 y está comprendida por tren periódico de pulsos de láser 32_{exp} . Tal como se ilustra esquemáticamente en la Fig. 1, los pulsos de láser 32_{exp} del haz de láser expandido 30_{exp} tienen un área en sección transversal mayor, pero una intensidad máxima menor que los pulsos de láser 32 del haz de láser 30 limitado en difracción.

El dispositivo de difracción 18 es eficaz para difractar el haz de láser expandido 30_{exp} para generar un haz de láser difractado 30_{diff} . El haz de láser difractado 30_{diff} está compuesto por un tren regular de pulsos de láser difractados 32_{diff} . Tal como se ilustra esquemáticamente en la Fig. 1, los pulsos de láser difractados 32_{diff} tienen cada uno una distribución de la intensidad en el espacio (es decir, transversal) que muestra una pluralidad de máximos de intensidad local 36_i (adoptando el índice i valores de 1 a N , en donde N indica el número total de máximos de intensidad local del pulso de láser difractado 32_{diff}). El patrón de difracción, es decir, la distribución de la intensidad transversal, es el mismo para todos los pulsos difractados 32_{diff} del tren. Como es fácil entender, un par de máximos de intensidad local espacialmente adyacentes estará separado por un mínimo de intensidad local (no designado específicamente en los dibujos).

En el caso a modo de ejemplo mostrado en la Fig. 1, los pulsos difractados 32_{diff} tienen cada uno un total de dos máximos de intensidad local 36_1 , 36_2 . Ha de entenderse que el aparato 10 no pretende quedar limitado a generar pulsos de láser difractados que tengan exactamente dos máximos de intensidad. En su lugar, el dispositivo de difracción 18 puede estar configurado para generar pulsos de láser difractados que tengan cualquier número de máximos de intensidad local mayor que dos, p. ej., tres, cuatro, cinco o seis máximos de intensidad. Estos máximos pueden tener un patrón de difracción unidimensional tal como, p. ej., a lo largo de una línea recta, o un patrón de distribución bidimensional tal como, p. ej., un patrón de matriz.

En el caso a modo de ejemplo mostrado en la Fig. 1, los máximos de intensidad local 36_1 , 36_2 de cada uno de los pulsos difractados 32_{diff} tienen diferentes intensidades. Ha de entenderse que en otras realizaciones, los máximos de intensidad local 36_1 , 36_2 pueden ser de una intensidad sustancialmente igual. En general, e independientemente del número total de máximos de intensidad local, el haz difractado 30_{diff} puede tener una distribución de la intensidad en sección transversal que exhiba dos o más máximos de intensidad local de magnitud sustancialmente igual y, alternativa o adicionalmente, dos o más máximos de intensidad local de magnitudes desiguales.

El dispositivo de difracción 18 incluye al menos un miembro de difracción que tiene un efecto difractivo para la radiación láser a medida que la radiación atraviesa el miembro de difracción. Un miembro de difracción a modo de ejemplo que se puede utilizar en el dispositivo de difracción 18 es un elemento óptico difractivo (DOE) que se entiende comúnmente como un elemento óptico que tiene un sustrato transparente (p. ej., un sustrato de vidrio) que ha sido diseñado a través de un proceso foto-litográfico para que tenga una o más estructuras de micro-rejilla que son eficaces para convertir un patrón de haz original en un patrón de haz diferente. Por ejemplo, el dispositivo de difracción 18 se puede configurar para convertir el patrón de haz transversal (es decir, x-y) del haz de láser 30_{exp} en un patrón de línea de puntos o en un patrón de matriz de puntos del haz difractado 30_{diff} , en donde cada uno de los puntos de los patrones de difracción incluye un máximo de intensidad local del haz difractado 30_{diff} . Un elemento óptico holográfico (HOE) es otro ejemplo de un miembro de difracción que es útil para lograr el efecto de difracción deseado para la radiación láser.

En realizaciones no mostradas específicamente en esta memoria, el dispositivo de difracción 18 puede estar dispuesto aguas arriba del expansor 16 del haz.

El objetivo de enfoque 22 enfoca el haz difractado 30_{diff} , resultando un haz de láser enfocado 30_{foc} (esquemáticamente indicado por las líneas de puntos en la Fig. 1). El objetivo de enfoque 22 puede ser, p. ej., de un tipo F-Theta y puede ser un objetivo de una sola lente o un objetivo multi-lentes. El haz de láser enfocado 30_{foc} está constituido por un tren periódico de pulsos de láser enfocados 32_{foc} , uno de los cuales se muestra esquemáticamente para fines de ilustración en la Fig. 1. La tasa de repetición de los pulsos de láser enfocados 32_{foc} emitidos por el aparato 10 está en el intervalo de kHz, MHz o GHz y, por ejemplo, en un intervalo de 50 kHz a 5 MHz o de 5 MHz a 50 MHz o de 50 MHz a 100 MHz o de 100 MHz a 500 MHz o hasta un intervalo de 1 GHz o mayor.

El aparato 10 está equipado con una estructura de escaneo adecuada para permitir el ajuste longitudinal de la posición del foco del haz láser enfocado 30_{foc} en la dirección z (es decir, en la dirección de la propagación del haz) y para permitir el ajuste transversal de la posición del foco en un plano x-y. Para el escaneo x-y del foco del haz, el escáner 20 puede incluir, de una manera generalmente conocida per se en la técnica, un par de espejos de escaneo 37 que están dispuestos para poder ser inclinados en torno a ejes de inclinación mutuamente ortogonales, tal como se indica esquemáticamente en la Fig. 1, dentro del recuadro que representa el escáner 20. Para el escaneo z del foco del haz, el expansor 16 del haz puede incluir un elemento óptico (no mostrado en los dibujos), configurado para ser ajustable de manera adecuada, con el fin de imponer un grado variable de divergencia al haz

de láser expandido 30_{exp} . Un elemento óptico de este tipo puede estar constituido, p. ej., por una lente de poder refractario variable o una lente dispuesta para ser ajustable posicionalmente en la dirección de propagación del haz. En diferentes realizaciones, otras partes del aparato 10 tales como, por ejemplo, el escáner 20 o el objetivo de enfoque 22 pueden estar equipadas con una capacidad de escaneo z.

5 La unidad de control 24 controla el funcionamiento global del aparato 10 bajo el control del programa de control 28, y particularmente controla el funcionamiento de la fuente de láser 14 y la estructura de escaneo del aparato 10, incluyendo el escáner 20. El programa de control 28 define un patrón de disparo que consiste en una pluralidad de posiciones de disparo, representada cada una por un conjunto de valores de coordenadas x, y y z en el sistema de coordenadas x-y-z del aparato 10, en donde el patrón de disparo está diseñado de manera que resulte
10 una incisión de una geometría deseada en el ojo 12. Cada una de las posiciones de disparo corresponde a la emisión de un disparo láser (es decir, un pulso enfocado 32_{foc}) por parte del aparato 10.

A medida que el foco del haz enfocado 30_{foc} se mueve en la dirección transversal (es decir, en un plano x-y) a través de una región diana del ojo 12 (región diana que puede estar en una superficie exterior del ojo 12 o dentro del ojo 12) de acuerdo con el patrón de disparo, la misma ubicación sobre o en el ojo 12 es sucesivamente irradiada con radiación procedente de una pluralidad de pulsos enfocados 32_{foc} , y se genera una foto-disrupción en el tejido del ojo en la ubicación como un efecto acumulativo de la deposición de energía procedente del compuesto de pulsos del sub-umbral en el tejido. Esto se explica con mayor detalle a continuación con referencia adicional a la Fig. 2.

La Fig. 2 muestra., a modo de un ejemplo no limitante, un boceto de un corte del lecho 38 en un plano x-y. El corte del lecho 38 es una incisión que se extiende bidimensionalmente en un plano x-y, y puede servir para definir un lecho del estroma para un colgajo de la córnea que se crea en la córnea del ojo 12 en el curso de un proceso LASIK. 38a designa una línea de bisagra a lo largo de la cual el colgajo permanece conectado con el tejido corneal circundante, de manera que el colgajo se puede plegar a un lado para dejar al descubierto el tejido comeal subyacente para la subsiguiente separación de un volumen predefinido de tejido utilizando radiación láser UV (p. ej., radiación láser de excímeros). Para generar el corte del lecho 38, se ha de efectuar una foto-disrupción en cada uno de una pluralidad de sitios de lesión yuxtapuestos en un plano x-y, de modo que la lesión del tejido asociada con la pluralidad de foto-disrupciones resulta en la creación del corte del lecho 38.

Una parte del patrón de disparo del haz para crear el corte del lecho 38 se visualiza esquemáticamente en la Fig. 2 en el lado de la derecha del corte del lecho 38 e incluye posiciones de disparo 40 dispuestas en un estilo de matriz en filas y columnas. La Fig. 2 muestra esquemáticamente, además, cuatro patrones de puntos 42a, 42b, 42c, 42d a modo de ejemplo del haz enfocado 30_{foc} . Los patrones de puntos 42a, 42b, 42c, 42d son una herramienta gráfica para representar la distribución de la energía x-y (y, por lo tanto, el patrón del haz x-y) del haz enfocado 30_{foc} en la zona del foco del haz, la mayor parte, si no toda, la energía está concentrada en las regiones representadas por los puntos ("regiones de puntos") y una poca, si no toda, la energía de radiación se encuentra fuera de estas regiones. Cada uno de los patrones de puntos 42a, 42b, 42c, 42d corresponde a una configuración diferente del dispositivo de difracción 18 del aparato 10. Cada uno de los puntos de un patrón de puntos representa un segmento en sección transversal (es decir, x-y) distinto del haz enfocado 30_{foc} y puede indicar un máximo de intensidad local 36_i respectivo del haz enfocado 30_{foc} . En el ejemplo ilustrado, diferentes colores de los puntos de un patrón de puntos representan diferentes intensidades de los máximos de intensidad local 36_i de las regiones de puntos y/o pueden representar diferentes energías de las regiones de puntos. Más específicamente, en los casos del ejemplo ilustrados de la Fig. 2 un punto negro representa un máximo de intensidad local 36_i de intensidad mayor y/o una mayor energía que un punto gris, y un punto gris representa un máximo de intensidad local 36_i de intensidad mayor y/o una mayor energía que un punto blanco.

Los patrones de puntos 42a, 42b están configurados cada uno como un patrón de línea de puntos, es decir, sus puntos están distribuidos a lo largo de una sola línea, que es una línea recta en los casos de ejemplo ilustrados. Para los patrones de puntos 42a, 42b el haz enfocado 30_{foc} incluye en cada caso un total de tres máximos de intensidad local 36_i , resultando un total de tres puntos para cada uno de los patrones 42a, 42b. En el patrón de puntos 42a, los puntos representan máximos de intensidad local 36_i de diferentes intensidades, tal como se indica por los diferentes colores de los puntos del patrón de puntos 42a. Una distribución 44a de la intensidad transversal a modo de ejemplo asociada se representa en la Fig. 2 en el lado de la derecha del patrón de puntos 42a. Como se puede ver, la distribución 44a de la intensidad exhibe máximos de intensidad local 36_1 , 36_2 , 36_3 de diferentes intensidades.

A la inversa, en el patrón de puntos 42b, los puntos representan máximos de intensidad local 36_i de la misma, o sustancialmente la misma intensidad, tal como se indica por los mismos colores para todos los puntos del patrón de puntos 42b. Una distribución 44b de la intensidad transversal a modo de ejemplo asociada se representa en la

Fig. 2 en el lado de la derecha del patrón de puntos 42b. Como se puede ver, la distribución 44b de la intensidad exhibe máximos de intensidad local 36_1 , 36_2 , 36_3 de igual intensidad.

Los patrones de puntos 42c, 42d están configurados cada uno como un patrón de matriz de puntos, es decir, sus puntos están dispuestos en una matriz $m \times n$ que tiene un número m de filas y un número n de columnas (en donde m y n son números enteros mayores que 1). Específicamente, el patrón de puntos 42c es una matriz 3×5 de puntos, y el patrón de puntos 42d es una matriz 3×3 de puntos. Dentro de una fila de la matriz, el haz enfocado 30_{foc} puede tener máximos de intensidad local de igual intensidad (como en el caso del diseño de puntos 42c) o de diferentes intensidades (como en el caso del patrón de puntos 42d). Sin embargo, cada una de las filas representa la misma, o sustancialmente la misma distribución de intensidades que cualquier otra fila de la matriz.

En determinadas realizaciones, la sección transversal x-y del haz enfocado 30_{foc} en la zona focal del mismo exhibe una concentración de energía a segmentos circulares tal como se ilustra por la forma circular de los puntos mostrados en la Fig. 2. No obstante, debe señalarse que el alcance de la presente descripción no pretende en modo alguno quedar limitado a estas realizaciones y que el haz enfocado 30_{foc} puede exhibir en su zona focal cualquier distribución de energía x-y adecuada que venga con una pluralidad de máximos de intensidad local dispersados en el espacio. El concepto de un patrón de puntos del haz enfocado 30_{foc} se utiliza sólo en esta memoria con el fin de facilitar la comprensión de la invención, y particularmente el concepto de crear una foto-disrupción en un material diana al superponer en el espacio la radiación procedente de segmentos transversales al menos parcialmente no solapantes de pulsos temporalmente sucesivos de una haz láser difractado.

El diámetro de cada una de las regiones de puntos puede estar entre $1 \mu\text{m}$ y $10 \mu\text{m}$ o entre $2 \mu\text{m}$ y $8 \mu\text{m}$ o entre $3 \mu\text{m}$ y $6 \mu\text{m}$, y puede ser sustancialmente igual al diámetro del foco de un haz no difractado que puede ser generado por el aparato 10 después de la separación del dispositivo de difracción 18.

La distancia mutua de posiciones de disparo 40 adyacentes del patrón de disparo en un plano x-y se designa con $d1$ en la Fig. 2 y está, p. ej., en un intervalo entre $1 \mu\text{m}$ y $10 \mu\text{m}$ o entre $2 \mu\text{m}$ y $8 \mu\text{m}$ o entre $3 \mu\text{m}$ y $6 \mu\text{m}$. La distancia mutua de máximos de intensidad local 36_i adyacentes del haz enfocado 30_{foc} (en la zona del foco del haz) en un plano x-y se designa con $d2$ en la Fig. 2 y es sustancialmente igual a la distancia $d1$. Una trayectoria de escaneo x-y del haz enfocado 30_{foc} se puede definir como una trayectoria de escaneo sinuosa tal como se representa esquemáticamente en 46 en la Fig. 2, en donde la trayectoria de escaneo sinuosa 46 incluye partes 46a de trayectoria rectilínea mutuamente paralelas conectadas por partes 46b de trayectoria inversa.

Por consiguiente, a medida que el haz enfocado 30_{foc} se mueve a través de las posiciones de disparo 40 en un plano x-y de acuerdo con una trayectoria de escaneo pre-definida tal como, p. ej., la trayectoria de escaneo sinuosa 46, la misma ubicación sobre o en el ojo 12 es irradiada sucesivamente con radiación procedente de diferentes partes en sección transversal del haz procedente de un conjunto de pulsos del haz enfocado 30_{foc} . Por ejemplo, considerando un patrón de difracción del haz enfocado 30_{foc} correspondiente al patrón 42a de la línea de puntos, un primer pulso del haz enfocado 30_{foc} irradia el ojo 12 en una ubicación específica asociada con una de las posiciones de disparo 40 con radiación procedente de uno de los puntos, p. ej., el punto blanco de la izquierda que representa la intensidad de pico más baja entre los puntos del patrón de puntos 42a. A medida que el haz enfocado 30_{foc} se mueve la distancia $d1$ entre pulsos sucesivos de acuerdo con la trayectoria de escaneo pre-definida, un subsiguiente segundo pulso del haz enfocado 30_{foc} aplica radiación de otro punto del haz enfocado 30_{foc} , p. ej., el punto gris del medio que representa la intensidad del pico, a la misma ubicación, es decir, la misma posición de disparo 40. Dado que el haz enfocado 30_{foc} es movido después de ello todavía otra vez en la distancia $d1$ de acuerdo con la trayectoria de escaneo pre-definida, un tercer pulso del haz enfocado 30_{foc} aplica radiación desde un tercer punto, p. ej., el punto negro de la derecha que representa la intensidad de pico más alta, a la misma ubicación del ojo 12 y finalmente provoca una foto-disrupción en el tejido del ojo en la posición de disparo 40 correspondiente. Se aplican consideraciones similares cuando el haz enfocado 30_{foc} tiene una distribución energía/intensidad correspondiente al patrón de puntos 42b.

De este modo, se puede implementar una aplicación multi-pulsos utilizando el haz enfocado 30_{foc} difractado. La foto-disrupción resulta de la deposición de energía procedente de diferentes porciones en sección transversal del haz enfocado 30_{foc} en el material irradiado a lo largo de una serie de pulsos del haz. El umbral necesario para provocar la foto-disrupción se puede alcanzar utilizando porciones en sección transversal del haz de diferente intensidad/energía del pico (como en el caso, p. ej., del patrón de puntos 42a) o porciones en sección transversal del haz de intensidad/energía del pico sustancialmente igual (como en el caso, p. ej., del patrón de puntos 42b). En realizaciones preferidas, el último pulso de la serie de pulsos que inciden en una ubicación específica del material irradiado desencadena finalmente la foto-disrupción en el material. En otras palabras, el umbral aplicable para la foto-disrupción sólo se sobrepasa en realizaciones con la llegada del último pulso de la serie.

- Debido al hecho de que el haz enfocado 30_{foc} es un haz difractado que tiene su energía esparcida por una zona que cubre una pluralidad de posiciones de disparo 40, y debido adicionalmente al hecho de que el haz enfocado 30_{foc} es movido en un plano x-y entre pulsos sucesivos en sólo la distancia d_1 , una pluralidad de posiciones de disparo 40 puede ser irradiada poco a poco con radiación procedente del haz enfocado 30_{foc} . Para una tasa de repetición de pulsos dada del haz enfocado 30_{foc} y una velocidad de escaneo x-y del haz dada, esto permite reducir el tiempo global necesario para generar una incisión deseada (p. ej., el corte del lecho 38 o un corte posterior o anterior para una lente intra-corneal (no mostrado)), en comparación con una aplicación multi-pulsos convencional que utiliza un haz láser limitado en la difracción para colocar una pluralidad de pulsos sucesivos en la misma posición de disparo antes de escanear el haz a una posición de disparo adyacente.
- 5
- 10 Una reducción adicional del tiempo de procesamiento global se puede conseguir difractando el haz láser para generar un patrón de puntos de la matriz tal como el patrón 42c o el patrón 42d. Un patrón de puntos bidimensional tal como el patrón 42c o el patrón 42d permite alcanzar una irradiación del material diana simultáneamente en las posiciones de disparo 40 en una pluralidad de líneas paralelas, de modo que la altura (distancia) entre porciones 46a de trayectoria rectilínea adyacentes de la trayectoria de escaneo sinusoidal 40 puede aumentar de manera correspondiente al número de líneas de las posiciones de disparo 40 cubiertas por el patrón de puntos de la matriz. Se puede generar un patrón de puntos bidimensional tal como el patrón 42c o 42d, p. ej., utilizando una rejilla óptica bidimensional o un holograma.
- 15

En los patrones de puntos 42c, 42d, cada una de las regiones de puntos puede representar un haz parcial del haz difractado, en donde cada uno de los haces parciales tiene un foco asociado. De acuerdo con determinadas realizaciones, los focos de los haces parciales tienen todos la misma, o sustancialmente la misma posición z. De acuerdo con otras realizaciones, los focos de los haces parciales no están todos en el mismo plano x-y. Por ejemplo, en el patrón de puntos 42d la posición del foco puede ser constante en la dirección z cuando uno se mueve de haz parcial a haz parcial en una dirección de la fila de la matriz (es decir, horizontalmente en el dibujo), mientras que la posición del foco puede variar en la dirección z cuando uno se mueve de haz parcial a haz parcial en una dirección de la columna de la matriz (es decir, verticalmente en el dibujo). Así, mientras que los haces parciales asociados con un triplete de puntos blancos, grises y negros procedente de la misma fila de la matriz pueden tener sus focos localizados en la misma posición z, los haces parciales asociados con los tres puntos negros pueden tener diferentes posiciones z de sus focos (y similarmente para los haces parciales asociados con los tres puntos grises y los haces parciales asociados con los tres puntos blancos).

20

25

30

REIVINDICACIONES

1. Un aparato para procesar por láser un material, comprendiendo el aparato:
una fuente de láser (14) configurada para proporcionar un haz (30) limitado en difracción de radiación láser pulsada;
- 5 un dispositivo de difracción (18) configurado para difractar el haz limitado en difracción para generar un haz difractado (30_{diff}) de radiación láser pulsada;
un dispositivo de enfoque (22) configurado para enfocar el haz difractado sobre el material; y
un controlador (24), configurado para controlar el haz difractado en el tiempo y el espacio para irradiar el material en una posición diana con radiación procedente de un conjunto de pulsos de radiación del haz difractado, de modo que cada uno de los pulsos de radiación procedente del conjunto de pulsos de radiación es incidente en la posición diana con una porción en sección transversal del haz difractado,
- 10 incluyendo la porción en sección transversal un máximo de intensidad local del haz difractado, en donde las porciones en sección transversal del haz de al menos un subconjunto de los pulsos del conjunto incluyen en cada caso un máximo de intensidad local diferente, en donde al menos un subconjunto de máximos de intensidad local del haz difractado se distribuye a lo largo de una línea, y en donde el controlador está configurado para controlar el haz difractado para mover el haz a lo largo de la posición diana en la dirección de la línea.
- 15 2. El aparato de la reivindicación 1, en el que las porciones en sección transversal del haz de al menos el subconjunto son distintas cuando se proyectan sobre un plano transversal o al menos un par de las porciones en sección transversal del haz de al menos el subconjunto son parcialmente solapantes cuando se proyectan sobre un plano transversal.
- 20 3. El aparato de una cualquiera de las reivindicaciones 1 o 2, en el que el haz difractado tiene una distribución puntual de máximos de intensidad local en una zona focal del haz.
4. El aparato de la reivindicación 3, en el que la distribución puntual es una distribución unidimensional, en donde, en particular, la distribución unidimensional es una de una distribución regular e irregular a lo largo de una curva, en donde la curva tiene una de curvatura cero y curvatura no cero.
- 25 5. El aparato de la reivindicación 3, en el que la distribución puntual es una distribución bidimensional, en donde, en particular, la distribución bidimensional es una de una distribución de matriz y una distribución basada en círculos concéntricos.
6. El aparato de la reivindicación 1, en el que los máximos de intensidad local distribuidos a lo largo de la línea incluyen dos o más máximos de diferentes valores de intensidad.
- 30 7. El aparato de la reivindicación 6, en el que los máximos de intensidad local distribuidos a lo largo de la línea están dispuestos con el fin de aumentar el valor de la intensidad, en donde un máximo del valor de intensidad más pequeño es incidente en la posición diana en un primer instante y un máximo de valor de intensidad mayor es incidente en la posición diana en un segundo instante que es después del primer instante, y/o
- 35 en el que los máximos de intensidad local distribuidos a lo largo de la línea incluyen dos o más máximos de valores de intensidad sustancialmente iguales.
8. El aparato de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en el que cada uno de los máximos de intensidad local del haz difractado se encuentra por debajo de un umbral de intensidad de un solo pulso para una descomposición óptica inducida por láser en tejido ocular humano.
- 40 9. El aparato de una cualquiera de las reivindicaciones 4 a 8, en el que el controlador está configurado para controlar el haz difractado para mover el haz a través del material, transversalmente con respecto a una dirección de propagación del haz de acuerdo con un patrón de disparo predeterminado para generar una foto-disrupción en cada una de una pluralidad de posiciones de disparo definidas por el patrón de disparo,
- 45 en el que una distancia entre posiciones de disparo adyacentes corresponde a una distancia entre máximos de intensidad local adyacentes de la distribución puntual.
10. El aparato de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, en el que la radiación de un pulso último en el tiempo en el conjunto de pulsos de radiación tiene la intensidad más alta entre el conjunto, en donde, en particu-

lar, la radiación del pulso último en el tiempo en el conjunto comprende un máximo de intensidad global del haz difractado.

5 11. El aparato de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, en el que el conjunto consiste en dos o más pulsos de radiación, y/o en donde el dispositivo de difracción incluye al menos una abertura, un bisturí, un modulador acústico óptico, un elemento óptico difractivo, una rejilla óptica y una rejilla holográfica.

12. El aparato de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, en el que la radiación láser tiene una duración del pulso en el intervalo de attosegundos, femtosegundos, picosegundos o nanosegundos, y/o en el que máximos de intensidad local adyacentes del haz difractado tienen una distancia menor que 20 μm o 15 μm o 10 μm u 8 μm o 6 μm o 5 μm o 4 μm o 3 μm o 2 μm en una zona focal del haz.

10 13. Un producto de programa de ordenador que comprende instrucciones que, cuando son ejecutadas por un controlador de un aparato de láser, determinan que se lleve a cabo un método tal como se define en la reivindicación 15.

14. Un medio de almacenamiento de información que almacena un producto de programa de ordenador tal como se define en la reivindicación 13.

15. Un método de procesamiento por láser de un material no biológico, comprendiendo el método:

15 proporcionar un haz limitado en la difracción de radiación láser pulsada;

difractar el haz limitado en la difracción para generar un haz difractado (30_{diff}) de radiación láser pulsada; y

enfocar el haz difractado sobre el material;

caracterizado por

20 controlar el haz difractado en el tiempo y el espacio para irradiar el material en una posición diana con radiación procedente de un conjunto de pulsos de radiación del haz difractado, de modo que cada uno de los pulsos de radiación procedente del conjunto de pulsos de radiación es incidente en la posición diana con una porción en sección transversal del haz difractado,

25 incluyendo la porción en sección transversal un máximo de intensidad local del haz difractado, en donde las porciones en sección transversal del haz de al menos un subconjunto de los pulsos del conjunto incluyen en cada caso un máximo de intensidad local diferente, en el que al menos un subconjunto de los máximos de intensidad local del haz difractado se distribuye a lo largo de una línea, en donde controlar el haz difractado incluye mover el haz a lo largo de la posición diana en la dirección de la línea.

