(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 365 150**

(51) Int. Cl.:
***A61F 9/008*** (2006.01)
***B23K 26/00*** (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(96) Número de solicitud europea: **06004388 .2**
(96) Fecha de presentación : **03.03.2006**
(97) Número de publicación de la solicitud: **1829510**
(97) Fecha de publicación de la solicitud: **05.09.2007**

(54) Título: **Dispositivo para el tratamiento por láser de una córnea.**

(73) Titular/es: **WAVELIGHT GmbH**
**Am Wolfsmantel 5**
**91058 Erlangen, DE**
**FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V.**

(72) Inventor/es: **Tünnermann, Andreas y**
**Vogler, Klaus**

(74) Agente: **Curell Aguilá, Marcelino**

(45) Fecha de publicación de la mención BOPI:
**23.09.2011**

(45) Fecha de la publicación del folleto de la patente:
**23.09.2011**

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).



Venta de fascículos: Oficina Española de Patentes y Marcas. Pº de la Castellana, 75 – 28071 Madrid

## DESCRIPCIÓN

Dispositivo para el tratamiento por láser de una córnea.

La presente invención se refiere a un dispositivo para el tratamiento por láser de una córnea.

Las siguientes formas de realización de la invención se centran en particular en el tratamiento por láser quirúrgico de la córnea con el objetivo de eliminar ametropías.

La utilización de láseres de femtosegundos para el tratamiento del material es conocida. Un láser de femtosegundos proporciona radiación láser pulsada con duraciones de impulso ultracortas en el rango de los femtosegundos. El concepto de rango de los femtosegundos debe entenderse en el marco de la invención, de tal manera que comprenda también longitudes de impulso en el rango de femtosegundos elevado de tres cifras, incluso hasta picosegundos de una cifra. En lo que se refiere al concepto de duración de impulso o longitud de impulso, éste se refiere a un valor medio estadístico, dado que se entiende que los impulsos individuales del láser no son por regla general todos exactamente igual de largos ni tienen exactamente el mismo de recorrido de intensidad. Como duración del impulso de un impulso de radiación láser se puede indicar, por ejemplo, una semilongitud.

Los láseres de femtosegundos comerciales para el tratamiento del material comprenden un oscilador láser, el cual puede generar impulsos de femtosegundos con una tasa de repetición o frecuencia de secuencia de impulsos en el rango de los MHz, por ejemplo con un orden de magnitud de 1 MHz hasta 100 MHz, y con una energía de impulso comparativamente pequeña en el rango inferior de los nJ, por ejemplo entre 0,1 y 10 nJ. La tasa de repetición de impulsos en el rango de los MHz corresponde a un intervalo de tiempo entre impulsos consecutivos del oscilador láser en el rango de los nanosegundos.

Para el reforzamiento de los impulsos por regla general con una energía relativamente débil de osciladores de láser de fs usuales se sabe, según una forma de proceder designada en el mundo profesional como chirped pulse amplification (CPA), estirar los impulsos, en su caso tras una preamplificación, en primer lugar temporalmente, antes de que sean amplificados con un nivel de intensidad comparativamente pequeño. A continuación los impulsos son comprimidos temporalmente. De esta manera, se pueden generar impulsos de radiación láser muy ricos en energía y, a pesar de ello, extremadamente cortos. La energía de los impulsos generados de esta manera está, por ejemplo, en el rango de los µJ o incluso de los mJ. Son adecuados, de forma sobresaliente, para el microtratamiento no térmico preciso de materiales, motivo por el cual los láseres de femtosegundos se usan también en aplicaciones en medicina, en especial, en la oftalmología.

Por ejemplo, en diferentes procedimientos de la cirugía ocular es necesario separar estructuras de tejido en o junto al ojo. En la cirugía ocular refractiva, por ejemplo, la cual intenta eliminar ametropías mediante la variación de las propiedades de refracción de la córnea, hay que practicar en algunos procedimientos cortes en la córnea, por ejemplo en la LASIK (Laserqueratomeleosis), donde se separada del epitelio de la córnea un disquito de tapa (conocido como Flap), que cuelga de una parte de su borde todavía de la córnea, el cual puede ser abatido hacia el lado, para dejar de este modo al descubierto las zonas de la córnea situadas debajo. Tras el abatimiento del Flap tiene lugar, mediante irradiación de radiación pulsada en el rango de longitudes UV bajo, una fotoablación de las zonas puestas al descubierto del estroma en la medida de un perfil de ablación preparado para el paciente en cuestión. En otro método de tratamiento refractivo, se pone al descubierto cortando, dentro de la córnea, un disquito en forma de lente mediante impulsos fs radiados al interior. Este disco de lente corresponde al volumen de material que hay que retirar de la córnea para la eliminación de la ametropía. El disquito de lente puesto al descubierto cortando se puede retirar entonces a través de una abertura lateral pequeña y la abertura lateral puede ser cerrada de nuevo. La utilización de láseres de femtosegundos en la cirugía ocular refractiva no se tiene en consideración por lo demás únicamente para la práctica de cortes sino también para una “evaporación” intraestromal de varias capas, que ya no requiere cortes en la córnea.

Con respecto a la utilización de láseres de femtosegundos en la cirugía ocular refractiva hace referencia, a título de ejemplo, a las dos publicaciones siguientes:

Tibos Juahsz *et al*.: “Corneal Refractive Surgery with Femtosecond Lasers”, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 5, Nº 4, Julio/Agosto de 1999, pp. 902-910.

C. L. Arnold *et al*.: “Streak formation as side effect of optical breakdown during processing the bulk of transparent Kerr media with ultra-short laser pulses”, Applied Physics B 80, 2005, pp. 247-253

Por lo menos en la cirugía ocular refractiva de femtosegundos es hasta ahora usual conseguir la separación de tejido deseada o la retirada de tejido deseada con un tren de impulsos individuales de fs que se repiten a intervalos de tiempo iguales, estando la tasa de repetición de impulsos del tren de impulsos radiado al interior del ojo, dependiendo del poder del amplificador principal del láser de femtosegundos (con frecuencia, se utiliza para ello un amplificador regenerativo) típicamente entre algunos kHz y algunos cientos de kHz. El rayo láser es conducido de esta manera al mismo tiempo sobre la zona de tejido de hay que tratar de manera que dos impulsos individuales

consecutivos no inciden sobre el mismo punto del tejido, sino sobre contiguos, aunque en determinadas circunstancias sobre puntos que se solapan algo.

El documento DE 101 25 206 B4 propone para la microestructuración de materiales tales como vidrio cuarzoso y grafito mediante impulsos de láser de fs utilizar, en lugar de impulsos individuales, impulsos dobles los cuales se componen de un impulso previo, con una energía más débil, y de un impulso principal, con una mayor energía, que viene a continuación. La energía del impulso previo y del impulso principal debe estar siempre por debajo del umbral de microestructuración del material que hay que tratar. Únicamente la energía de ambos impulsos parciales junta debe estar por encima de este umbral. Mediante el impulso previo deben ser iniciados procesos primarios en el material, los cuales deben ser todavía perceptibles al incidir el impulso principal. Gracias a ello, se puede tratar el material mejor con el impulso principal, sin provocar roturas o tensiones en el material.

Para que una variación a la cual ha dado lugar el impulso previo sea perceptible todavía al incidir el impulso principal el intervalo de tiempo del impulso principal con respecto al impulso previo debería estar en una escala de tiempos de sub-picosegundos o una de picosegundos. En concreto, se indica para vidrio cuarzoso un intervalo de tiempo de 0,6 ps y para grafito un intervalo de tiempo de 2 ps. En el documento, no se menciona nada acerca de cómo se generan los impulsos dobles, en particular nada acerca de como se puede conseguir, de forma estable y fiable, el intervalo de tiempo, extremadamente corto, entre el impulso previo y el impulso principal.

El documento US 2005/015120 A1 describe un dispositivo, apoyado mediante láser, para la generación de imágenes artificiales de excitación neuronal en la retina. Un dispositivo similar se conoce gracias al documento WO 02/074176 A1. En ambos casos no se trata del tratamiento de material del ojo sino únicamente de una modulación de la actividad neuronal de la retina mediante la irradiación de luz.

El documento US 2005/236380 A1 se refiere al tratamiento por láser de un material mediante varios impulsos láser irradiados de manera directamente consecutiva sobre este punto del material. La fluencia de cada impulso individual del gran número de impulsos está al mismo tiempo por debajo del umbral válido para el tratamiento del material con un impulso individual.

El documento US 2003/222324 A1 da a conocer un dispositivo para la retirada mediante ablación de pistas conductoras y de partes de una capa de pasivación situadas debajo en un circuito integrado mediante impulsos láser. Los impulsos están organizados en grupos, Se da a conocer que la energía de los impulsos de un grupo puede ser igual o variar. Cada impulso da lugar a una retirada de una parte del grosor de las pistas que hay que retirar.

La invención se plantea el problema de indicar un camino de como, durante el tratamiento fotodisruptivo por láser de una córnea, se pueden conseguir resultados de gran calidad, en los cuales se pueden evitar muy bien variaciones de material no deseadas fuera de las zonas de material que hay que tratar. Al mismo tiempo, estos resultados de gran calidad deben poder conseguirse de forma fiable, es decir que deben ser reproducibles con una uniformidad relativamente alta, lo que tiene en especial una enorme importancia en el caso de tratamientos con láser en el ojo o en otras partes sensibles del cuerpo.

Para la solución de este problema se prevé, según la invención, un dispositivo según la reivindicación 1.

La invención parte de un dispositivo para el tratamiento fotodisruptivo por láser de una córnea estando el dispositivo creado para emitir un tren de impulsos de radiación láser con una duración de impulso en el rango de los femtosegundos en dirección hacia la córnea, comprendiendo el tren de impulsos un gran número de grupos de impulsos consecutivos, comprendiendo cada grupo de impulsos por lo menos dos impulsos de radiación láser, estando creado el dispositivo para dirigir los impulsos de radiación láser de un grupo de impulsos esencialmente sobre el mismo lugar de tratamiento de la córnea, y a pesar de ello, dirigir los impulsos de radiación láser de grupos de impulsos consecutivos sobre, esencialmente, lugares de tratamiento esencialmente distintos de la córnea.

El intervalo de tiempo entre dos impulsos de radiación láser consecutivos de un grupo de impulsos está en el rango de los nanosegundos, en especial en el rango inferior de los nanosegundos. Las investigaciones han demostrado que, en especial en materiales biológicos transparentes y entre ellos de nuevo en especial en el tejido de la córnea, se pueden crear con un impulso previo de fs adecuado energéticamente y/o en cuanto a la intensidad, se pueden crear de forma que duran comparativamente mucho condiciones de este tipo, que permiten un acoplamiento altamente eficaz de un impulso principal de fs posterior en el material de punto deseado. Dado que duran mucho se hace referencia aquí a un intervalo de tiempo el cual es esencialmente más largo que el intervalo de tiempo enseñado en el documento DE 101 25 206 B4 de al lo sumo picosegundos de una cifra entre el impulso previo y el principal.

De hecho, se ha demostrado, por ejemplo, que en el tejido de la córnea se pueden generar, con un impulso previo adecuado, microvariaciones las cuales pueden existir hasta 10 ns o incluso más. Correspondientemente “separados” pueden estar los impulsos de un grupo de impulsos en el tren de impulsos emitido por el dispositivo según la invención. La ventaja de ello es que impulsos consecutivos con un intervalo de tiempo en el rango de los

nanosegundos se pueden generar, con componentes comerciales de óptica y optoelectrónica con mayor facilidad de forma estable y con propiedades uniformes que los impulsos con un intervalo de a lo sumo algunos picosegundos. Esto es válido tanto para los propios impulsos como también para el intervalo de tiempo entre los impulsos. La mejor reproducibilidad conduce entonces por fuerza a mejores resultados en el tratamiento del material. El concepto de rango de nanosegundos no debe interpretarse en el marco de la invención en ningún caso de forma tan estrecha que excluya picosegundos de tres cifras desde un buen principio. Por el contrario, deben verse en especial intervalos de picosegundos de tres cifras altos entre impulsos consecutivos de un grupo de impulsos como asimismo pertenecientes del ámbito de la invención. Las microvariaciones, a las cuales se puede dar lugar en el material de la córnea mediante un impulso previo, pueden estar presentes por ejemplo en forma de microlesiones del tejido de la córnea y/o en forma de una cantidad mayor de electrones libres. Los electrones de este tipo, liberados por un impulso previo, pueden conducir, en caso de incidir un impulso principal posterior, a un proceso de alud más rápido y/o efectivo, el cual da lugar en último lugar a la fotodisrupción.

El intervalo de tiempo entre dos impulsos de radiación láser consecutivos de un grupo de impulsos puede, según una forma de realización preferida, ser de menos de 100 ns, preferentemente de menos de 50 ns, mucho más preferentemente de menos de 20 ns, por ejemplo en el rango de nanosegundos de una cifra hasta a lo sumo aproximadamente 10 ns.

De dos impulsos de radiación láser consecutivos de un grupo de impulsos un impulso previo posee una energía menor y/o una intensidad máxima menor que el impulso siguiente. Al mismo tiempo, la energía y/o la intensidad máxima del impulso precedente es de a lo sumo una cuarta parte y aún mejor de a lo sumo una décima parte de la energía o de la intensidad máxima del impulso siguiente. Por ejemplo, la energía o la intensidad máxima del impulso precedente puede ser aproximadamente una vigésima parte de la del impulso posterior.

Cada grupo de impulsos puede comprender, según una forma de realización, en total dos impulsos de radiación láser. En el marco de la invención, no está excluido evidentemente que los grupos de impulsos comprendan, en cada caso, tres o más impulsos de radiación láser. El intervalo de tiempo en la escala nano según la invención entre impulsos consecutivos de un grupo de impulsos puede estar prescrito al mismo tiempo para una parte de los pares de impulsos contiguos de un grupo de impulsos o para todos los pares de impulsos contiguos del grupo de impulsos. Si un grupo de impulsos contiene tres o más impulsos, entonces todos los impulsos del grupo pueden tener diferente energía y/o intensidad máxima. En especial, la energía y/o intensidad máxima puede ser cada vez mayor desde el primero hasta el último impulso de un grupo. De manera alternativa, es imaginable que una parte de los impulsos de un grupo, en particular al final del grupo, tenga aproximadamente la misma energía y/o intensidad máxima.

El dispositivo de tratamiento puede contener un dispositivo de desviación de rayo (llamado escáner), mediante el cual el rayo láser se puede mover sobre una zona del material que se quiere tratar. En general, el problema consistirá al mismo tiempo en ajustar la velocidad de desviación del escáner y los intervalos de tiempo entre los impulsos de un grupo de impulsos y entre los grupos de tal manera entre sí que los impulsos de un grupo irradien esencialmente sobre el mismo lugar, si bien grupos de impulsos consecutivos irradien esencialmente sobre lugares diferentes. A este respecto, se recomienda ajustar el intervalo de tiempo de dos grupos de impulsos consecutivos por lo menos un orden de magnitud, preferentemente varios ordenes de magnitud, mayor que los intervalos de tiempo de impulsos de radiación láser consecutivos de un grupo de impulsos.

Como se ha mencionado anteriormente, existen láseres de femtosegundos comerciales cuyo oscilador láser puede generar impulsos de radiación láser con una tasa de repetición en el rango de los MHz, es decir con intervalos de tiempo en el margen de los nanosegundos. Se conocen ya también láseres de femtosegundos los cuales mediante un conmutador electroóptico, por ejemplo, una célula Pockels, pueden seleccionar impulsos individuales de la secuencia de impulsos continua generada por el oscilador y que emiten únicamente los impulsos seleccionados, por regla general después de amplificación, como radiación de tratamiento. Con un conmutador electroóptico de este tipo resulta una posibilidad ventajosa para cada impulso de radiación láser del tren de impulsos emitido de seleccionar, con la ayuda del conmutador, en cada caso un impulso de entre los impulsos generados por el oscilador láser. Esto significa que no hay que generar, de manera compleja y difícilmente controlable, un impulso doble a partir de un impulso individual para formar los impulsos de un grupo de impulsos. En lugar de esto, todos los impulsos de un grupo, y por consiguiente, de la totalidad del tren se pueden obtener, mediante selección individual, a partir de los impulsos del oscilador láser, es decir, cada impulso de tratamiento emitido corresponde en cada caso a un impulso láser del oscilador. Si la tasa de repetición de impulsos del oscilador láser utilizado es tan alta que el intervalo de tiempo de impulsos consecutivos del oscilador está en el margen de los nanosegundos, en especial en el rango inferior de los nanosegundos, dos impulsos consecutivos del oscilador tienen automáticamente el intervalo de tiempo según la invención para dos impulsos consecutivos de un grupo de impulsos.

Para la generación de impulsos con una intensidad diferente en el tren pueden estar previstos medios de modulación de la intensidad, los cuales permiten el ajuste de una intensidad deseada para cada impulso seleccionado. Al mismo tiempo, es especialmente ventajoso que como modulador de intensidad se pueda utilizar un conmutador electroóptico, que se puede aprovechar también para la selección de impulsos, por ejemplo, la célula Pockels mencionada. Dependiendo de la intensidad de impulso deseada el conmutador se abre más o menos. Se sobreentiende que para la selección de impulsos y la formación de impulsos pueden estar previsto, en caso

necesario, también componentes separados.

A continuación, la invención se continúa explicando a partir de los dibujos adjuntos, en los que:

la Figura 1 muestra de manera esquemática, un ejemplo de forma de realización de un dispositivo para el tratamiento mediante cirugía láser refractiva del ojo;

la Figura 2 muestra de manera esquemática, una disposición para la selección de impulsos individuales de una secuencia regular de impulsos de radiación láser, y

la Figura 3 muestra una representación para la explicación del principio de la selección de impulso individual y de la formación de impulso mediante un conmutador electroóptico.

Se hace referencia en primer lugar a la Figura 1. El dispositivo de tratamiento por láser representado de manera esquemática en esta figura comprende un oscilador láser 12 bombeado por un módulo de láser de bombeo 10, que genera una secuencia de impulsos de radiación láser, los cuales van uno tras otro a intervalos regulares. La secuencia de impulsos está indicada de manera esquemática mediante el número de referencia 14. La duración temporal de los impulsos individuales está en el rango de femtosegundos, por ejemplo en aproximadamente 200 fs. La tasa de repetición de impulsos del oscilador láser 12 está en el rango de los MHz, en particular en el rango de los MHz de tres cifras, de manera que resulta un intervalo de los impulsos de la secuencia 14 de aproximadamente 10 ns o incluso inferior. Los osciladores de fs con tasas de repetición de impulsos de 100 MHz, 200 MHz o incluso más se pueden obtener como tales comercialmente. La longitud de onda de la radiación láser generada está, por ejemplo, en la banda inferior del infrarrojo, aproximadamente entre 1000 y 1100 µm. Otras longitudes de onda son asimismo posibles en el marco de la invención, en especial también longitudes de onda en la banda del UV.

De la secuencia de impulsos 14 generada por el oscilador láser 12 selecciona un selector de impulsos 16, mediante selección de impulso individual, un tren de impulsos indicado esquemáticamente en 18, el cual se compone de grupos de impulsos consecutivos de en cada caso un impulso 20 de energía o intensidad más débil y un impulso 22 posterior de energía e intensidad más fuerte. Cada uno de los impulsos 20, 22 es seleccionado mediante selección individual de un impulso correspondiente de la secuencia 14. El intervalo temporal entre los impulsos 20, 22 de un grupo de impulsos corresponde al intervalo temporal entre los impulsos de la secuencia 14, es decir que los impulsos 20, 22 de un grupo de impulsos son formados mediante selección de dos impulsos inmediatamente consecutivos de la secuencia 14. En las tasas de repetición, mencionadas a título de ejemplo anteriormente, del oscilador láser 12 el intervalo de tiempo entre los impulsos 20, 22 de un grupo de impulsos es por consiguiente de aproximadamente 10 ns o menos. Se sobreentiende que los impulsos de un grupo de impulsos no tiene que deducirse fundamentalmente de los impulsos directamente consecutivos de la secuencia 14. Más bien es imaginable que el selector de impulsos 16 selecciones, para el grupo de impulsos, impulsos de la secuencia 14, los cuales estén separados por lo menos por un impulso intermedio.

El intervalo de tiempo entre los grupos de impulsos del tren de impulsos 18 es, por el contrario, un múltiplo del intervalo de tiempo entre los impulsos 20, 22 de un grupo. Por ejemplo, el intervalo de tiempo entre los grupos de impulsos puede estar en el rango de los microsegundos.

Se entiende que en una forma de realización modificada cada grupo de impulsos puede contener más de dos impulsos individuales, por ejemplo, tres.

El generador de impulsos 16 está formado como conmutador electroóptico el cual puede seleccionar, a partir de la secuencia de impulsos 14 generada, impulso individuales con intensidad ajustable. Dependiendo de cuanto se “abra” el conmutador electroóptico, los impulsos seleccionados están más o menos debilitados en cuanto a su intensidad. Mediante el control correspondiente del selector de impulsos 16 se puede realizar, por consiguiente, el tren de impulsos 18 representado en la Figura 1. Como conmutador electroóptico el selector de impulsos 16 puede contener por ejemplo una célula, Pockels. En una célula Pockels se puede determinar, a través del nivel de la tensión aplicada, la intensidad del debilitamiento de los impulsos seleccionados (es decir, esencialmente ningún debilitamiento para los impulsos 22, si bien un debilitamiento significativo para los impulsos 20).

Los impulsos 20, 22 seleccionados pueden ser preamplificados a continuación en un preamplificador 24 opcional, antes de que experimenten, mediante *chirped pulse amplification,* una amplificación principal. Durante esta amplificación CPA los impulsos 20, 22 son dilatados de forma temporalmente reversible y son amplificados hasta un nivel de energía moderado o final. A la dilatación de los impulsos, la cual tiene lugar en su así llamado Stretcher 26, se da lugar mediante un elemento dispersivo, que aprovecha los diferentes tiempos de recorrido de distintas porciones espectrales del impulso durante el paso a través del elemento dispersivo para la dilatación del impulso. Mediante la dilatación del impulso se reduce el nivel de intensidad del impulso, de manera que durante la amplificación en un amplificador principal de fs 28 se pueden evitar efectos parasitarios no lineales. El amplificador principal 28 puede ser, por ejemplo, un amplificador regenerativo.

Los impulsos amplificados que están disponibles a la salida del amplificador principal 28 pueden ser amplificados

con posterioridad en un amplificador posterior 30 opcional, antes de ser comprimidos mediante un compresor 32. El compresor 32 comprime, mediante la utilización de un elemento dispersivo con efectos de tiempo de recorrido inversos, la dilatación de impulsos del Stretcher 26, en el caso ideal por completo. El amplificador principal 28 puede contener otra unidad de selección de impulsos (no designada por separado en la Figura 1) la cual, por ejemplo, selecciona de nuevo los impulsos amplificados, mediante el método llamado Cavity-Dump, y gracias a ello los diferencia con mayor nitidez del fondo. El amplificador posterior 30 puede contender un dispositivo telescópico para el ensanchamiento del rayo.

A la salida del compresor 32 está preparado un tren de impulsos 18', el cual corresponde a la muestra del tren de impulsos 18, cuyos impulsos 20'. 22' son sin embargo en total más ricos en energía y fuertes en intensidad que los impulsos 20, 22 del tren de impulsos 18. La relación de energía o de intensidad entre los impulsos 20' y los impulsos 22' corresponde preferentemente esencialmente a la existentes entre los impulsos 20 y 22. Esta relación puede estar, por ejemplo, en el rango aproximadamente del valor 10, es decir que la energía o la intensidad de los impulsos 22' es aproximadamente este valor mayor que la energía o la intensidad de los impulsos 20'. También la longitud de los impulsos 20', 22' corresponde preferentemente esencialmente a la de los impulsos 20, 22. Debido a la compensación de la dispersión ideal que no se puede alcanzar por regla general por completo del Stretcher 26 mediante el compresor 32 puede ser que los impulsos 20', 22' tengan una duración temporal algo más larga que los impulsos 20, 22. En cualquier caso la duración de los impulsos 20', 22' está asimismo en el rango de los femtosegundos, con el fin de posibilitar el tratamiento del material casi atérmico deseado con una lesión lateral mínima.

Los impulsos 20', 22' son orientados a continuación, mediante una unidad de desviación 34 y una unidad de enfoque 36, sobre la zona objetivo que hay que trata (en este caso, la córnea de un ojo 38 humano). La unidad de desviación 34 da lugar a una desviación de tal tipo de la radiación láser que incide sobre la córnea que impulsos 20', 22' pertenecientes al mismo grupo de impulsos inciden esencialmente en el mismo lugar o dentro de la córnea, mientras que los impulsos de grupos de impulsos consecutivos inciden esencialmente en lugares contiguos. El impulso previo 20' con una energía más débil de un grupo de impulsos da lugar, mediante ionización de multifotones, a la formación de un microplasma en el destino de la córnea. El impulso principal 22' con mayor energía que viene a continuación puede acoplarse de manera eficiente en este plasma, o en general: en el volumen de material modificado por el impulso previo, y posibilitar una fotodisección eficaz del tejido del estroma. Debido a las microvariaciones ya existentes del material de la córnea se transmite del impulso principal 22', si es que lo hace, únicamente una porción comparativamente pequeña a través del foco y llega a la retina. La parte que pasa a través del foco del impulso previo 20' hasta la formación de la variación del micromaterial es, por el contrario, comparativamente pequeña, motivo por el cual la carga con rayos de la retina se puede reducir de forma esencial frente a los procedimientos de tratamiento de la córnea convencionales con radiación de impulso individual. La energía de los impulsos principales 22' puede estar, por ejemplo, en el rango desde los µJ de una cifra hasta 10 µJ o incluso por encima. La energía de los impulsos previos 20' es, por el contrario, - como se ha indicado ya anteriormente, por ejemplo, de únicamente aproximadamente una 1/10 de esta energía.

Para ofrecer una estimación numérica únicamente a título de ejemplo supóngase que el intervalo de tiempo de los impulsos irradiados sobre la zona objetivo de un grupo de impulsos es de 10 ns, la distancia entre grupos de impulsos (es decir, el intervalo de tiempo entre dos grupos de impulsos consecutivos) es de 5 µs y la velocidad de desviación del escáner es de 1 m/s. Para estos valores numéricos los grupos de impulsos consecutivos inciden con una separación de lugar de 5 µm sobre la zona objetivo, mientras que la diferencia de lugar de dos impulsos consecutivos de un grupo de impulsos es de únicamente 0,01 µm. La separación de lugar de los impulsos de un grupo de impulsos es con ello varios órdenes de magnitud menor que la separación de lugar de dos grupos de impulsos consecutivos, incidiendo los impulsos de un grupo de impulsos esencialmente en el mismo lugar. Esto garantiza que el impulso principal de un grupo de impulsos pueda incidir de hecho en el volumen de material modificado por un impulso previo del mismo grupo de impulsos.

Se hace referencia a continuación a la Figura 2. Esta figura muestra una configuración a título de ejemplo la cual permite desacoplar, de impulsos generados por un resonador láser, impulsos individuales mediante un conmutador electroóptico. El resonador láser está designado en general mediante 40 en la Figura 2. Presenta, de una forma en sí conocida, un medio láser 42, a cuyos dos lados (referidos al eje longitudinal de resonador designado mediante 44) están dispuestos un espejo final 46 altamente reflectante así como un espejo 48 semitransparente. Dentro del resonador, delimitado entre los dos espejos 46, 48, están dispuestos además un conmutador 50 electroóptico, por ejemplo una célula Pockels, así como una bifurcación de polarización 52 formado por un polarizador de capa fina. Mediante un impulso de tensión aplicado al conmutador 50 electroóptico se puede girar la polarización de un impulso de fs que circule en el resonador, y ello de tal manera que el impulso de polarización girada sea reflejado en la bifurcación de polarización 52 y sea desacoplado del resonador a lo largo de una dirección de desacoplamiento 54. En 56 se muestra a título de ejemplo un impulso individual desacoplado de este tipo. En los tiempos en los cuales del conmutador electroóptico está libre de tensión, los impulsos que circulan en el resonador no experimentan giro de polarización, motivo por el cual pasan a través de la bifurcación de polarización 52 y son desacoplados en el espejo 48 semitransparente. Los impulsos de este tipo desacoplados a lo largo del eje de resonancia principal 44 están indicado en 58 a título de ejemplo. Se reconoce que la secuencia de impulsos formada por los impulsos 58 presenta un hueco en el lugar en el cual el impulso 56 con la polarización girada fue desacoplado por la bifurcación

de polarización 52.

En la disposición según la Figura 2, se puede generar por consiguiente, mediante el control de la tensión aplicada al conmutador 50 electroóptico, un impulso individual de la secuencia de impulsos generada por el oscilador láser 40. Si se toma una velocidad de conmutación del conmutador 50 electroóptico en el margen de aproximadamente 1 ns, entonces esta velocidad de conmutación es suficientemente rápida como, para una tasa de repetición del oscilador 40 de aproximadamente 10 ns, poder seleccionar de manera selectiva impulsos individuales.

La Figura 2 representa, evidentemente, solo una de muchas configuraciones imaginables, para formar el tren de impulsos 18 de la Figura 1. Se entiende que a diferencia de la configuración a título de ejemplo de la Figura 2 se pueden desacoplar, en primer lugar, todos los impulsos que circulan en el oscilador como secuencia de impulsos continua y que, sólo a continuación, se pueden desacoplar impulsos individuales mediante un conmutador electroóptico dispuesto fuera del oscilador. Esto corresponde esencialmente a la configuración según la Figura 1, en la cual el selector de impulsos 16 se muestra fuera del oscilador 12.

La Figura 3 explica como, mediante variación de la tensión U aplicada a una célula Pockels 58 o a otro conmutador electroóptico, se puede formar el tren de impulsos 18 según la Figura 1 a partir de una secuencia de impulsos 60 continua. En la Figura 3, designa $\Delta t$ el intervalo de tiempo entre impulsos consecutivos de la secuencia 60, es decir la inversa de la tasa de repetición de impulsos, mientras que $\Delta T$ designa el intervalo de tiempo entre grupos de impulsos del tren de impulsos 18. Como se muestra en el diagrama de líneas características U(t) (en el que t designa el tiempo) dibujado en el símbolo de conmutación de bloque para la célula Pockels 58, se puede formar con un recorrido escalonado de la tensión U aplicada un grupo de impulsos con un impulso previo con una energía más débil y un impulso principal con una energía más fuerte. Si durante el escalón de tensión más bajo un impulsos de la secuencia 60 llega a la célula Pockels 58, este impulso es seleccionado como un impulso previo 20, cuya intensidad corresponde al valor de la tensión U durante el escalón de tensión más bajo. Si, por el contrario, un impulso de la secuencia 60 llega, durante el escalón de tensión más alto a la célula 58, este impulso se deja pasar como impulso principal 22, no dándose lugar preferentemente esencialmente a ningún debilitamiento de la intensidad por parte de la célula 58. Para todos los tiempos restantes la tensión aplicada a la célula Pockels 58 es cero. Correspondientemente, durante estos tiempos, no se transmite ninguno de los impulsos de la secuencia 60 a través de la célula 58.

Se entiende que en caso de más de dos impulsos por grupo de impulsos se puede utilizar una línea característica de la tensión correspondientemente modificada. En especial, se puede utilizar una línea característica de tres o más escalones, cuando no deben existir únicamente dos niveles de intensidad dentro de un grupo de impulsos, sino tres o más.

La célula Pockels 58 de la Figura 3 puede estar implementada en el selector de impulsos 16 de la Figura 1 o formar el conmutador electroóptico 50 de la Figura 2.

**REIVINDICACIONES**

1. Dispositivo para el tratamiento fotodisruptivo por láser de una córnea, estando configurado el dispositivo para emitir un tren (18') de impulsos de radiación láser con una duración de impulso en el rango de los femtosegundos en dirección hacia la córnea, comprendiendo el tren de impulsos un gran número de grupos de impulsos consecutivos, comprendiendo cada grupo de impulsos por lo menos dos impulsos de radiación láser (20', 22'), estando configurado el dispositivo para dirigir los impulsos de radiación láser de un grupo de impulsos esencialmente sobre el mismo lugar de tratamiento de la córnea, y a pesar de ello, dirigir los impulsos de radiación láser de grupos de impulsos consecutivos esencialmente sobre diferentes lugares de tratamiento de la córnea, estando el intervalo de tiempo de dos impulsos de radiación láser (20', 22') consecutivos de un grupo de impulsos en el rango de los nanosegundos, y presentando un impulso (20') precedente de dos impulsos de radiación láser consecutivos de un grupo de impulsos una energía menor y/o una intensidad máxima menor que el impulso (22') siguiente, caracterizado porque la energía y/o la intensidad máxima del impulso (20') precedente supone como máximo una cuarta parte de la energía o de la intensidad máxima del impulso (22') siguiente, de tal manera que es el impulso siguiente el que da lugar a una fotodisrupción del material de la córnea.

2. Dispositivo según la reivindicación 1, caracterizado porque el intervalo de tiempo de dos impulsos de radiación láser (20', 22') consecutivos de un grupo de impulsos es de menos de 100 ns, preferentemente menos de 50 ns, más preferentemente de menos de 20 ns, por ejemplo en el rango de nanosegundos de una cifra de hasta como máximo aproximadamente 10 ns.

3. Dispositivo según la reivindicación 1 ó 2, caracterizado porque la energía y/o la intensidad máxima del impulso (20') precedente es de cómo máximo una décima parte de la energía o de la intensidad máxima del impulso (22') siguiente, por ejemplo, aproximadamente una vigésima parte.

4. Dispositivo según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque cada grupo de impulsos comprende en total dos impulsos de radiación láser (20', 22').

5. Dispositivo según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque el intervalo de tiempo entre dos grupos de impulsos consecutivos es por lo menos un orden de magnitud, preferentemente varios órdenes de magnitud, mayor que el intervalo de tiempo de impulsos de radiación láser consecutivos de un grupo de impulsos.

6. Dispositivo según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque el dispositivo comprende un oscilador láser (12) para la generación de impulsos de radiación láser consecutivos con intervalos de tiempo iguales, estando configurado el dispositivo para seleccionar, para cada impulso de radiación láser del tren de impulsos (18') emitido, mediante unos medios electroópticos de conmutación (16), en cada caso, un impulso de entre los impulsos generados por el oscilador láser.

7. Dispositivo según la reivindicación 6, caracterizado porque presenta unos medios de modulación de la intensidad (16) para el ajuste de una intensidad deseada de un impulso (20, 22) seleccionado y/o de un perfil de intensidad deseado en un grupo de impulsos seleccionado.

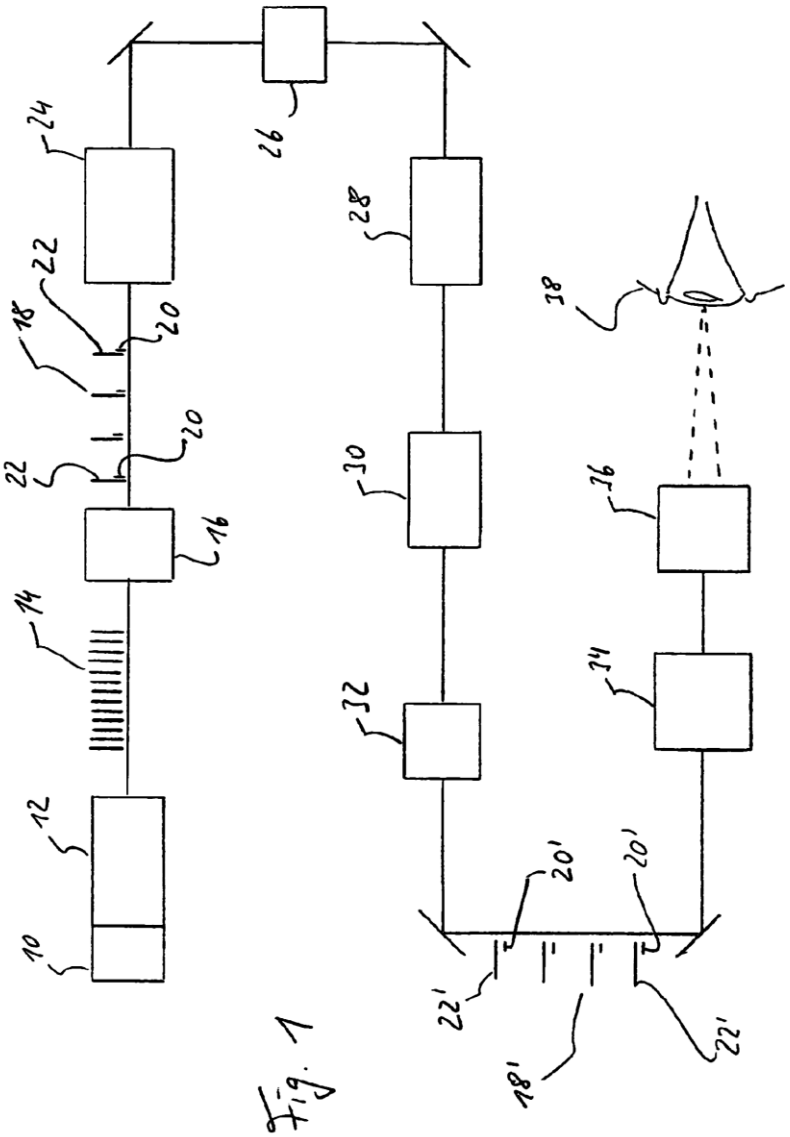


Fig. 1

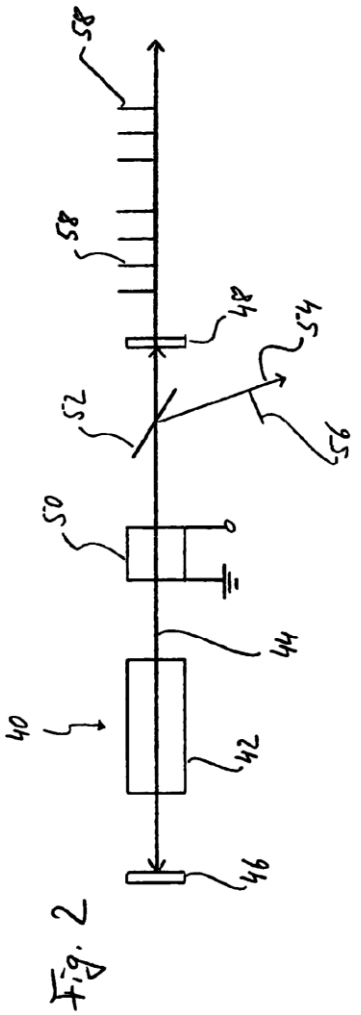


Fig. 2

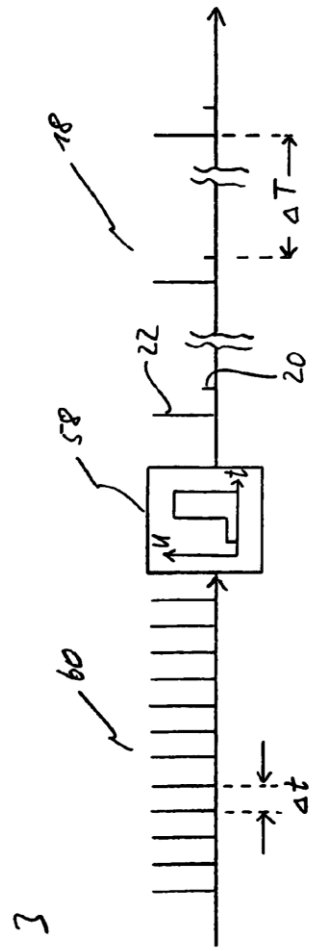


Fig. 3