



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 365 220**

51 Int. Cl.:
A61F 9/008 (2006.01)
A61F 9/01 (2006.01)
B23K 26/06 (2006.01)
B23K 26/00 (2006.01)
A61F 9/009 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **04735284 .4**
96 Fecha de presentación : **28.05.2004**
97 Número de publicación de la solicitud: **1628606**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **01.03.2006**

54 Título: **Dispositivo para el mecanizado preciso de material.**

30 Prioridad: **02.06.2003 US 475583 P**
23.07.2003 US 625157

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
26.09.2011

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
26.09.2011

73 Titular/es: **CARL ZEISS MEDITEC AG.**
Göschwitzer Strasse 51-52
07745 Jena, DE

72 Inventor/es: **Bendett, Mark;**
Bischoff, Mark;
Gerlach, Mario y
Muehlhoff, Dirk

74 Agente: **Roeb Díaz-Álvarez, María**

ES 2 365 220 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

Dispositivo para el mecanizado preciso de material.

5 La invención se refiere a un dispositivo para el mecanizado preciso de material y tejido, en particular un dispositivo láser para el mecanizado preciso, con precisión de micrómetros, de material orgánico, preferentemente un ojo.

En una valiosa contribución al estado de la técnica, en el documento de patente DE 197 46 483 de la solicitante se describe cómo, con precisión de micrómetros, en el mecanizado de amplia superficie de materiales con láser con
10 gran diámetro de haz (mm – cm) se ablacionan, evaporan o funden cantidades de material macroscópicas (láser CO₂, Nd:YAG, Excimer...).

En otra valiosa contribución al estado de la técnica, en el documento de patente DE 197 27 573 de la solicitante se describe un algoritmo de cómo un rayo láser puede ser desviado para conseguir un mecanizado lo mejor posible y
15 los más preciso posible de material.

En el documento US 5, 656, 186 se describe un procedimiento para el mecanizado de material evitando al mismo tiempo o minimizando efectos secundarios dañinos (bordes fundidos, daño térmico, ondas de choque acústicas, conformación de grietas) por medio de la elección de una duración de pulsos especial dependiendo del material.
20

La acción de mecanizado del material del láser está limitada en este caso a la pequeña región espacial del foco del láser (típicamente algunos μm^3), en la que la intensidad de la luz es suficientemente alta para sobrepasar el umbral de rotura óptica. De modo localizado en este volumen de foco se destruye la cohesión del material, y se genera una burbuja de cavitación. Si se desvía el foco del láser para cada pulso del láser a una nueva posición, se pueden
25 generar patrones de corte lineales, planos o tridimensionales. La distancia entre burbujas de cavitación contiguas se ha de corresponder al final del mecanizado aproximadamente con su diámetro, para que el material se pueda desprender mecánicamente de modo sencillo a lo largo de los cortes.

Los dispositivos láser existentes para el mecanizado de material con pulsos de láser de femtosegundos usan
30 amplificadores regenerativos con tasas de repetición de hasta 15 kHz, con los que se amplifican pulsos individuales de un oscilador de femtosegundos. Mientras que el propio oscilador sólo proporciona energía de pulsos en el intervalo de nanojulios, los pulsos con un amplificador regenerativo pueden ser amplificados hasta una energía de pulso de algunos milijulios. Mientras que estas fuentes láser están indicadas para aplicaciones con tasas de erosión elevada por pulso de láser, no son óptimas para la aplicación descrita anteriormente para cortes de precisión.
35

Se conoce el hecho de usar este tipo de láser para cirugía refractiva de córnea. Las energías de pulso convencionales tienen un valor de 5 μJ a 10 μJ . Gracias a ello se generan burbujas de cavitación, cuyo diámetro tiene un valor de 10 μm a 30 μm . Por medio de estos tamaños de burbuja se ocasiona una microrugosidad del corte generado en el mismo orden de magnitud. Por otro lado se conocer que una microrugosidad en este orden de
40 magnitud sólo permite resultados refractivos insatisfactorios.

En el documento US 5 993 438 se describe un procedimiento para el mecanizado de tejidos oculares. Los pulsos de rayo láser tienen una longitud de pulso entre 100 fs y 10 ns y una frecuencia de pulso de 0,1 kHz a 0,1 MHz, teniendo la energía un valor de 200 GW/cm² con una longitud de pulso de 50 ps y un diámetro de foco de 10
45 micrómetros.

En el documento WO 01/54853 se describe un procedimiento y un dispositivo para el mecanizado de material. Los pulsos de rayo láser que presentan características similares a la de la reivindicación 1, se describen ahora conjuntamente con un mecanizado de la superficie.
50

En K. König et al., Optics Letters Vol. 26, Nº 11 (2011) se ha descrito cómo también con pulsos de nanojulios desde un oscilador de femtosegundos se pueden realizar cortes en el tejido. Puesto que en este caso, sin embargo, un único pulso láser no lleva a la conformación de una burbuja de cavitación, sino que son necesarios varios pulsos dispuestos en el mismo lugar para conseguir un efecto de corte, este procedimiento es adecuado sólo para figuras
55 de corte muy finas en escala de micrómetros. Para el empleo industrial o médico no está indicada esta fuente láser.

El objetivo de la presente invención, así pues, es proporcionar un dispositivo para el mecanizado preciso de material, con el que se eviten las desventajas del estado de la técnica.

Este objetivo se consigue por medio del dispositivo de acuerdo con la reivindicación independiente. Otras configuraciones ventajosas están indicadas en las reivindicaciones dependientes.

En particular, el objetivo se consigue por medio de un dispositivo para el mecanizado preciso de material, en particular material orgánico, en el que este dispositivo genera en el material que se ha de mecanizar burbujas de cavitación cuyo diámetro es menos de 10 μm . Para conseguir esto, se enfoca un rayo láser pulsado con una energía de menos de 5 μJ en un diámetro de foco de pocos μm . Preferentemente, el diámetro del foco tiene un valor de aproximadamente 3 μm , y la energía de pulso tiene un valor de 1 μJ . Además, el dispositivo se caracteriza porque por medio del uso de una tasa de repetición de pulso de más de 50 kHz se permite un mecanizado muy rápido. Esto representa una gran ventaja, en particular, para la cirugía de córnea, ya que con ello se consigue un tiempo de operación de pocos segundos hasta aproximadamente 1 minuto.

El objetivo se consigue, además, por medio de un dispositivo para el mecanizado preciso de material, en particular material orgánico, que comprende un sistema láser pulsado con los parámetros descritos anteriormente como fuente de rayo, en el que por medio de un dispositivo de radiación con al menos un medio para la desviación de rayos se puede aplicar un rayo de trabajo de la fuente de rayos sobre el material, estando correlada la emisión de pulsos con la desviación de rayos, y comprendiendo el medio para el desvío de rayos medios para la liberación de pulsos láser. Por liberación se entiende en este caso que el láser se libera para un impulso láser, y el impulso láser se dispara tan pronto como el láser de modo correspondiente a su tasa de repetición máxima puede entregar de nuevo un impulso láser. Por correlación de la emisión de pulsos con la desviación del rayo se entiende, en particular, que la emisión de pulsos se puede realizar cuando el rayo se desvía en un punto determinado, es decir, la emisión de pulsos se controla, así pues, dependiendo de la desviación de rayos.

En una configuración especial, el objetivo mencionado previamente se consigue por medio de un dispositivo para el mecanizado preciso de material, en particular material orgánico, que comprende un sistema láser pulsado como fuente de rayos, teniendo la energía de la radiación un valor aproximadamente de 100 nJ a 10 μJ , preferentemente de 500 nJ a 5 μJ . La tasa de repetición de la radiación tiene en este caso un valor, preferentemente, de 50 kHz a 1 MHz, prefiriéndose especialmente de 100 kHz a 500 kHz. El diámetro de foco de la radiación tiene un valor, en este caso, preferentemente, aproximadamente de 500 nm a 10 μm , prefiriéndose especialmente de 3 μm a 5 μm . La duración del pulso de la radiación tiene un valor, preferentemente, aproximadamente de 100 fs a 1 ps, prefiriéndose especialmente de 200 fs a 500 fs.

Los medios para la conformación del rayo y/o para la desviación del rayo o bien, formulado de modo general, los sistemas de conformación y desviación del rayo pueden comprender microópticas de difracción o de refracción, u ópticas adaptativas o sistemas ópticos clásicos. Con elementos de difracción o de refracción, en este caso, se pueden reemplazar varios elementos ópticos clásicos o convencionales.

El dispositivo mencionado para el mecanizado preciso de material se emplea preferentemente para el tratamiento oftalmológico de ojos, en particular para la corrección de la ametropía de un ojo. El dispositivo se puede usar para el corte de un corte corneal o denticulo en la córnea para la corrección de la ametropía. Además de un corte del denticulo, con el dispositivo conforme a la invención se pueden generar en córnea estructuras de refracción, por ejemplo en forma de spots dispuestos uno junto a otro o una nube de puntos.

Del mismo modo se pueden emplear directamente disparos de láser para la regeneración de estructuras de refracción. Por ejemplo, se pueden generar en la lente ocular pequeñas burbujitas por medio de la evaporación de material o líquido. Para ello se requieren muchos disparos de láser con una energía comparativamente reducida, que se pueden preparar con el dispositivo conforme a la invención.

Del mismo modo se pueden practicar con el dispositivo conforme a la invención cortes dirigidos en el tejido, por ejemplo en la lente ocular, y con ello mejorar la curvatura y la elasticidad de la lente ocular, ya que las partes de tejido contiguas sólo se pueden desplazar entre ellas ligeramente. El dispositivo para el mecanizado preciso de material, en particular de material orgánico, se emplea en esta configuración de la invención como dispositivo para el tratamiento de la presbicia. La conformación del rayo se realiza o bien de modo convencional o con microópticas de difracción o de refracción u ópticas adaptativas. La desviación del rayo se realiza preferentemente por medio de sistemas de escaneado.

Las fuentes de rayo láser adecuadas son disposiciones de amplificador de oscilador, en las que para el amplificador están indicados, en particular amplificadores regenerativos, amplificadores de compresión de impulsos (CPA) o amplificadores multipaso.

Por lo que se refiere a la forma constructiva del oscilador acoplado en modos están indicados, en particular, los osciladores de láser de disco, los osciladores de láser de fibra, aunque también los osciladores de láser de varilla. Por lo que se refiere a la forma constructiva del amplificador están indicados, en particular, amplificadores de láser de disco, amplificadores de láser de fibra, aunque también amplificadores de láser de varilla.

Como fuente de bombeo para los medios láser se prefieren especialmente diodos láser de semiconductores como consecuencia de su prolongada vida útil, fiabilidad, posibilidad de regulación, y sus costes de fabricación comparativamente reducidos.

Los medios láser preferidos en las fuentes de rayo láser mencionadas anteriormente son materiales de estado sólido dotados, en particular cristales y vidrios. Por ejemplo, estos son YAG, wolframato, zafiro y cristales de fluoruro.

Estos materiales huéspedes pueden estar dotados, preferentemente, con neodimio, erbio, titanio, cromo, litio o iterbio. Todos estos materiales se caracterizan por medio de una emisión láser espectral de banda ancha en el intervalo espectral de 600 nm a 2000 nm, y comprende con ello el intervalo espectral especialmente indicado para la cirugía de córnea refractiva entre 800 nm y 1200 nm.

El gran ancho de banda espectral de la emisión láser de los materiales mencionados anteriormente soporta una duración de pulso láser ultracorta entre 50 fs y 1 ps. En este caso no se requiere que el propio láser emita pulsos de esta duración de pulso, pero que la duración de impulso preferida de aproximadamente 300 fs se consiga en la pieza de trabajo que se ha de mecanizar o bien en su superficie. Para tal fin, el dispositivo comprende un módulo óptico que sirve para influenciar la función de fase espectral del pulso láser de modo adecuado. En particular, este módulo óptico genera un pre-chirp lineal, cuyo valor está adaptado al chirp lineal del sistema óptico. Este módulo óptico puede estar integrado ya en una fuente de rayo láser de modo adecuado, en particular, se puede combinar con un compresor de pulso de una fuente de rayo láser CPA, o puede ser idéntica a éste.

El material que se ha de mecanizar con precisión de micrómetros puede ser material con estructuras en el intervalo de micrómetros, rejillas, lentes de contacto, plásticos, lentes intraoculares (IOL), plaquitas de semiconductores, elementos microópticos, etc. Especialmente se prefiere material orgánico, como por ejemplo tejido, prefiriéndose especialmente el tejido del ojo humano.

El sistema láser pulsado es una disposición de una fuente de rayo láser para la generación de pulsos fs y dispositivos ópticos correspondientes, en particular espejos, lentes, etc.

En una configuración del dispositivo conforme a la invención está previsto que los medios para la desviación de los rayos se operen en el modo de escaneado. El rayo de trabajo de la fuente de rayos se puede desviar en este caso en bandas que se repiten periódicamente en una dimensión, de manera que, por ejemplo, se pueden generar bandas en forma circular de diferente diámetro o bandas en forma espiral. Las bandas del rayo de trabajo se pueden generar por medio de un dispositivo rotativo o sujeto de otra manera sobre una banda, por ejemplo por medio de un espejo, una lente, una rejilla o similar. Los medios para la desviación del rayo pueden comprender escáneres, por ejemplo, escáneres mecánicos, que están alojados de modo móvil sobre las bandas prefijadas. La presente invención usa sistemas de desvío rápido, que desvían el láser en las bandas naturales del sistema de desvío, es decir, por ejemplo, a bandas circulares o bandas espirales con los sistemas de desvío en rotación. En lugar de aproximar posiciones individuales y disparar allí un impulso láser tan pronto como se ha alcanzado la posición prefijada, y volver a parar el sistema de desvío, la banda del sistema de desvío pasa sin paradas, y los pulsos son entregados por medio de una tasa de repetición preseleccionada, prefijada a través de la velocidad de la banda del movimiento del foco, comenzando en un instante definido.

Así pues, tan pronto como la posición del foco ha alcanzado un punto determinado, se libera el láser, y con ello se envían pulsos láser sobre la región de mecanizado. Esto lleva a una traza de volúmenes de actuación, consecuentemente posiciones modificadas en el material por medio del foco láser durante la breve duración del impulso, a lo largo de una banda fundamentalmente predefinida, que está caracterizada en particular porque los volúmenes de actuación contiguos se colocan a una distancia constante predefinida, por ejemplo en el orden de magnitud del diámetro de las burbujas de cavitación. Por medio de ligeras modificaciones de la banda natural del sistema de desvío, por ejemplo por medio de una ligera reducción del radio de la banda circular, por ejemplo en el valor de la distancia de volúmenes de actuación contiguos, se pueden escribir trazas que se complementan para formar una superficie de corte. Por ejemplo, aquí se pueden generar bandas concéntricas o bandas en forma espiral o similares. Al usar un espejo de desvío, esto puede suceder, por ejemplo, por medio de una variación de la

inclinación con una rotación constante del espejo. El objetivo es que la superficie de corte deseada se solape con una retícula uniforme de volúmenes de actuación o focos láser. Las bandas naturales del sistema de desvío, como consecuencia de la elevada tasa de repetición del sistema láser, se pueden pasar muy rápidamente con un transcurso temporal definido. La adaptación de la secuencia temporal de los pulsos láser lleva entonces al solape deseado de la superficie de corte con disparos láser.

En otro ejemplo de realización de la presente invención están previstos otros dispositivos de rayos para la conformación de rayos y/o para el guiado de rayos y/o para la desviación de rayos y/o para el enfoque de rayos. Por medio de estos dispositivos de rayos se puede desviar y conducir el rayo de modo preciso sobre el material que se ha de mecanizar, tal y como requiere la aplicación planeada. Los pulsos láser ultracortos enfocados en este caso en un diámetro de foco en el orden de magnitud de $3\ \mu\text{m}$ pueden deshacer, en particular como consecuencia de su reducida energía de pulso de aproximadamente $1\ \mu\text{J}$ en una burbuja de cavitación pequeña precisa la cohesión del material y/u ocasionar modificaciones estructurales en el material o pueden cargar regiones contiguas en el material de modo térmico, acústico o mecánico. Para cortes macroscópicos y estructuras en la escala de centímetros se escanea el foco del láser de modo tridimensional a través del material que se ha de mecanizar. El caso de aplicación determina cómo se sintonizan entre ellos la fuente de rayos, la guía y la conformación de rayos, el escáner, el algoritmo de escaneado y la óptica de enfoque, para conseguir una elevada velocidad de mecanizado manteniendo al mismo tiempo una elevada precisión.

La conformación de rayos sucede en este caso preferentemente por medio de un telescopio (preferentemente un telescopio galileo con lente convergente y lente divergente), que ensancha el diámetro del rayo de tal manera que el láser se puede enfocar en un foco correspondientemente pequeño. Preferentemente se usa un sistema de lentes que minimiza el error de representación del telescopio en gran medida.

El guiado del rayo se realiza preferentemente por medio de espejos o de parejas de espejos, con las que el rayo se puede ajustar en los subcomponentes individuales.

La desviación del rayo pueden ser escáneres convencionales o bien sistemas de desvío mecánicos de rayo láser como espejos galvanométricos en funcionamiento de bucle cerrado, etc. Preferentemente, sin embargo, son escáneres mecánicos, que recorren bandas prefijadas (por ejemplo bandas circulares), y que por medio del disparo de la fuente de rayo disparan en las posiciones previstas, gracias a ello, pulsos láser. De este modo se puede trabajar en una región grande de la superficie de corte con una tasa de repetición completa con movimientos de escaneado relativamente lentos.

El dispositivo de enfoque de rayos sirve para neutralizar en el foco del rayo en el material o en su interior la cohesión del material (fotodisrupción). Por lo general, esto se realiza conjuntamente con una evaporación local del material. Preferentemente, para ello el láser se enfoca sobre un diámetro en el intervalo de los micrómetros. Éste está cerca del límite de difracción de la luz en el intervalo visible o en el intervalo cercano al infrarrojo. La óptica de enfoque, debido a ello, presenta preferentemente una apertura numérica elevada, y con ello una distancia focal corta y una gran abertura óptica (diámetro de rayo láser ensanchado). Preferentemente, el rayo que parte desde la fuente láser se ensancha antes del enfoque en el material o en el tejido en el diámetro. Los sistemas para el guiado, desviación y enfoque del rayo están diseñados debido a ello preferentemente para un gran diámetro del rayo.

La fuente láser, la desviación del rayo (escáner) y la óptica de enfoque están sincronizadas entre ellas de tal manera que se hace posible un corte preciso y rápido en el recorrido de la fotodisrupción. En este caso se colocan haces láser con un diámetro de foco que va de algunos $100\ \text{nm}$ a algunos μm con una distancia de haz en el orden de magnitud del diámetro de burbuja de cavitación en el material.

En una forma de realización especialmente preferida se pueden programar los dispositivos de rayos, en particular los dispositivos de desvío. Por medio de la posibilidad de sincronización de los dispositivos de rayos individuales entre ellos y el control por medio de programas correspondientes se puede ajustar el sistema de los dispositivos de rayos conjuntamente con el sistema láser pulsado de modo preciso al material y al requerimiento del corte para el que se ha de emplear. De este modo, dependiendo de la transparencia y de la capacidad refractiva del material que se ha de mecanizar, así como del requerimiento en relación a la geometría de corte y la duración de la operación se puede preseleccionar y adaptar el juego de parámetros por medio de programa.

In otra forma de realización preferida de la presente invención están previstos además dispositivos de sujeción para el posicionamiento y/o la fijación del material que se ha de mecanizar. Por medio de estos dispositivos de fijación se garantiza que las estructuras con precisión de micrómetros que se pueden establecer por medio del láser conforme

a la invención no se ven perjudicadas por medio de movimientos incontrolados del material que se ha de mecanizar, en particular del ojo humano.

Un dispositivo de fijación y de posicionamiento de este tipo puede ser un dispositivo de apriete sencillo para una pieza de trabajo, que preferentemente está equipada con posibilidades de ajuste de múltiples ejes para el movimiento de inversión de la pieza de trabajo para un ajuste óptimo. Los dispositivos de fijación para las aplicaciones médicas en órganos, como por ejemplo, el ojo, se han de adaptar además a las particularidades biológicas correspondientes. La fijación del ojo humano se puede realizar, por ejemplo, con la ayuda de un adaptador especial y un anillo de aspiración de vacío.

Con las elevadas tasas de repetición descritas, se puede localizar, de modo adaptado con las energías de pulso descritas de bajo valor y los dispositivos de desvío, la acción del láser para la fotodisrupción de un modo preciso. Gracias a ello se destruye en un volumen de foco limitado nítidamente la estructura de material, en regiones contiguas vecinas (distanciadas menos de un micrómetro) no tiene lugar por lo general ninguna modificación del material. A partir de ello resulta una elevada precisión de mecanizado (precisión de micrómetros) al cuidar de las regiones de material contiguas. La carga térmica y mecánica de las regiones no mecanizadas son claramente menores que en otros métodos de mecanizado.

En otra forma de realización preferida del dispositivo conforme a la invención, por medio del dispositivo de radiación, en particular el dispositivo de desvío, se puede aplicar un rayo de trabajo de la fuente de rayos en forma que se puede predeterminar geoméricamente en un transcurso temporal que se puede predeterminar sobre el material. Por medio de la acción conjunta de los componentes individuales, así pues, es posible generar cortes y estructuraciones. Para la generación de un spot en el que se haya deshecho la estructura del material, es suficiente por lo general con un pulso láser con parámetros de pulso definidos (energía de pulso, duración de pulso, foco). Para cortes y estructuración se ha de colocar un gran número de este tipo de spots de modo compacto uno junto al otro. La distancia entre spots contiguos ha de estar al final del procedimiento en el orden de magnitud de las burbujas de cavitación. Para ello, el foco láser se puede mover mientras escanea por encima o bien a través del material. El foco láser sigue idealmente una banda geométrica prefijada tridimensional con precisión de micrómetros. De este modo es posible, por ejemplo, generar un corte en el material que se ha de mecanizar gracias al hecho de que se controle una superficie cualquiera, por ejemplo una superficie rectangular de spots de micrómetros contiguos en el tejido escaneándose uno tras otro. Gracias a ello se deshace de modo preciso en este plano la cohesión del material, y con ello se genera un "corte" en el tejido. Del mismo modo es posible aplicar el foco del láser por medio de movimientos circulares del escáner en una banda circular sobre el material que se ha de mecanizar. Por medio de un guiado en forma de hélice a continuación del rayo de mecanizado, de este modo, se puede recortar, por ejemplo una superficie cilíndrica del material. Puesto que la fotodisrupción tiene lugar preferentemente en una región muy estrecha, el rayo láser puede actuar también en un tejido sin que se dañe el material atravesado por el rayo láser fuera del foco. De este modo se pueden recortar todo tipo de bandas geométricas y con ello formas por medio de fotodisrupción en el material.

En la cirugía de córnea refractiva, con el dispositivo conforme a la invención se puede realizar un guiado de corte especial. En este caso no se prepara ningún corte de córnea tradicional, sino que el dentículo preparado anteriormente en la córnea con el dispositivo conforme a la invención por medio de uno o varios cortes laterales limitados, que se generan a su vez con el dispositivo conforme a la invención, se extrae en el contorno. Con esta finalidad puede ser ventajoso seccionar el dentículo previamente a través de uno o varios cortes con el dispositivo conforme a la invención. En particular, una sección tiene especialmente sentido de manera que a continuación se pueda realizar una retirada de las partes por medio de aspiración con una cánula de aspiración-lavado.

En el ejemplo de realización preferido de la presente invención está previsto un dispositivo en el que el rayo de trabajo pulsado se puede aplicar por medio del dispositivo de desvío de rayo sobre el material, y durante esto se puede modificar la tasa de repetición del pulso del rayo de trabajo. Por medio de la previsión de un dispositivo para la modificación de la tasa de repetición al mismo tiempo que se realiza un guiado del rayo del rayo de trabajo a través del material que se ha de mecanizar se puede generar de esta manera de modo elegante un patrón de spot sobre el material que se ha de mecanizar, incluso cuando el rayo se orienta bajo diferentes ángulos o con diferente velocidad a través del dispositivo de desvío sobre el material que se ha de mecanizar. Una ventaja particularmente obvia se consigue, por ejemplo, cuando el dispositivo de desvío desvía el rayo en bandas circulares sobre el material que se ha de mecanizar, y estas bandas circulares se generan con una frecuencia de circulación especial del dispositivo de desvío, en particular, por ejemplo, el espejo de desvío. En caso de que, por ejemplo, con una frecuencia de circulación de 50 Hz se guía el rayo láser en una banda circular de 1 cm de diámetro con una tasa de repetición de 300 kHz, entonces en cada banda circular, por revolución, se disponen distribuidos de modo uniforme

60.000 spots. Cuando el rayo se guía entonces en un círculo de sólo 0,5 cm de diámetro con la misma frecuencia del dispositivo de desvío, entonces por medio de la reducción de la tasa de repetición del rayo de trabajo se puede generar la misma distancia de los spots individuales entre ellos sobre el material que se ha de mecanizar que en el guiado del rayo en la banda circular mayor. Por medio de una modificación correspondiente de la tasa de repetición 5 dependiendo de la geometría recorrida por medio del dispositivo de desvío se pueden generar de esta manera patrones geométricos aleatorios con una distancia de spot fundamentalmente constante sobre el material que se ha de mecanizar. Por ejemplo, se pueden recorrer espirales en las que desde el exterior hacia el interior con una frecuencia de circulación constante del dispositivo de desvío la tasa de repetición siempre disminuye. Además de esto también se puede pensar en cualquier otro tipo de forma geométrica. En caso de que no se pretenda 10 precisamente un distanciamiento constante de los spots individuales sobre el material, sino que se haya de alcanzar, por el contrario, en una región especial, una elevada densidad de spots y en otra región una densidad de spots más reducida, entonces esto se puede generar igualmente por medio de la combinación de los parámetros seleccionados para la tasa de repetición del rayo de trabajo y la frecuencia o el transcurso temporal del dispositivo de desvío. De este modo, preferentemente, también es posible generar de modo gradual diferentes regiones con diferente 15 densidad de foco. Por ejemplo, en un círculo el centro pueden presentar una distancia focal muy reducida, mientras la distancia focal hacia el borde es cada vez mayor.

Igualmente es posible un procedimiento para la aplicación de pulsos fs de una fuente de rayo láser con las características mencionadas anteriormente, en particular una elevada tasa de repetición y energía de pulso reducida 20 sobre un material, en particular un material orgánico, en particular el ojo humano, en el que en el foco del rayo láser se mecaniza el material por medio de fotodisrupción, o bien se deshace su cohesión.

En un procedimiento especialmente preferido, el rayo láser pulsado se desvía por medio de un dispositivo de desvío sobre el material que se ha de mecanizar, y dependiendo del patrón de spot generado a través de ello sobre el 25 material se modifica la tasa de repetición del pulso del rayo láser. De este modo se puede generar cualquier tipo de patrón de spot, y en particular cualquier distancia de los spots individuales entre ellos en la geometría deseada sobre el material que se ha de mecanizar. De modo especialmente preferido, los patrones de spots se distribuyen de tal manera sobre el material que se ha de mecanizar que la burbuja de cavitación de cada spot individual, que se genera por medio de fotodisrupción, se coloca precisamente junto a la burbuja de cavitación del siguiente spot. De 30 este modo se origina entonces un patrón de corte deseado de burbujas de cavitación directamente contiguas. Para casos de aplicación especial también se puede desear colocar los spots todavía más compactos. Esto se recomienda, por ejemplo, cuando el material que se ha de mecanizar se renueva después de un cierto tiempo, y se ha de garantizar la separación del material durante un tiempo especial, antes de que, por ejemplo, se pueda retirar el núcleo del taladro, u otra pieza extraída del material que se ha de mecanizar. Del mismo modo se puede pensar en 35 colocar primero los spots con una mayor distancia, para en una etapa posterior rellenar los huecos entre los spots, y gracias a ello conformar un patrón deseado de burbujas de cavitación.

El dispositivo conforme a la invención se puede usar para la cirugía refractiva por medio del mecanizado de la 40 córnea o de la lente del ojo.

A continuación se han de explicar otras configuraciones ventajosas de la invención a partir del dibujo. En ellas se muestra:

Fig. 1 muestra una representación esquemática de un ejemplo de realización de un láser conforme a la 45 invención;

Fig. 2 muestra otro ejemplo de realización de un láser conforme a la invención con microscopio de operación y ojo a ser mecanizado;

50 Fig. 3 muestra una representación esquemática de algunos ejemplos de posibles patrones de sección, que se pueden realizar con el sistema láser conforme a la invención;

Fig. 4 muestra de modo esquemático una vista detallada de una secuencia de spots de láser en líneas 55 circulares; y

Fig. 5 muestra la evolución temporal de las secuencias de pulsos láser dentro y fuera del resonador láser;

Fig. 6 muestra el guiado de la sección para la generación de una lentícula en la sección a través de la 60 córnea;

Fig. 7 muestra el proceso de la extracción de la lentícula seccionada a través de una pequeña sección lateral;

5 Fig. 8 muestra la lentícula seccionada en la vista en planta desde arriba de la córnea;

Fig. 9 muestra otra forma del guiado de sección, en la que la lentícula se separa, y se puede extraer a través de dos secciones laterales;

10 Fig. 10 muestra otra conformación del procedimiento, en el que la lente se separa en muchas partes, que se retiran con un dispositivo de aspiración-lavado.

En la Figura 1 se representa una representación esquemática de los componentes individuales de un ejemplo de realización de un sistema láser conforme a la invención. El dispositivo de mecanizado 1 comprende como fuente de rayo 11 una fuente de rayo láser fs. El rayo láser 15 se desacopla a través de un espejo y un divisor de rayos 57 en una óptica de ensanchamiento de rayos 21. El rayo láser 15' ensanchado se desvía entonces a través de un dispositivo de desvío de rayos, como por ejemplo un escáner, en la dirección XY sobre un dispositivo de enfoque de rayos 24. Éste se puede desplazar en el eje Z, y permite de esta manera el desplazamiento del punto focal por medio del desplazamiento del dispositivo de enfoque de rayos a lo largo de la flecha Z. Alternativamente se puede usar un sistema óptico de enfoque con distancia focal variable, para desplazar la posición focal en la dirección Z de modo controlado. El spot láser enfocado 16 se desvía de esta manera sobre el material 90 que se ha de mecanizar, que se sujeta por medio de un dispositivo de fijación 32 en su posición. El material 90 es en este caso una lente de contacto que se ha de mecanizar. El spot 16 también se puede orientar por medio del desplazamiento del dispositivo de fijación 32 en la dirección XY' o bien Z' sobre el o en el material.

25 Por medio del dispositivo de mecanizado 1 se enfoca el rayo láser 15 generado por la fuente de rayo 11 sobre el material 90. Un diámetro de foco de pocos micrómetros se puede conseguir gracias al hecho de que el rayo láser 15 se enfoque con un diámetro de rayo de pocos milímetros por medio de una óptica con algunos centímetros de distancia focas. Por ejemplo, para un perfil de rayo en forma gaussiana resulta un diámetro de foco de tres micrómetros, cuando se enfoca un rayo láser de longitud de onda 100 nm y un diámetro de rayo de 10 mm con una distancia focal de 50 mm.

En particular, el rayo láser 15 posee en la salida de la fuente de rayo 11 un diámetro de rayo menor de lo que es necesario para el enfoque óptimo. Con una óptica de ensanchamiento de rayo 21 se puede adaptar el diámetro de rayo a los requerimientos. En particular, como óptica de ensanchamiento de rayo 21 se puede emplear un telescopio ajustado a infinito según Galilei (lente divergente y lente convergente). En este caso no se origina ningún foco intermedio, que bajo ciertas circunstancias podría llevar ya a una rotura óptica en el aire. Con ello, la energía láser restante es mayor, y el perfil de rayo permanece igual. Se prefiere el uso de sistemas de lentes que llevan a características de representación óptimas del telescopio. Por medio del ajuste del telescopio se pueden compensar también oscilaciones de fabricación en la divergencia de los rayos de la fuente de rayos 11.

En un ejemplo de realización el foco del láser se mueve realizando un escaneado por encima o bien a través del material. El foco del láser o bien el spot del láser 16 se escanea de esta manera de modo tridimensional con precisión de micrómetros. El rayo láser 15' ensanchado se desvía perpendicularmente respecto a la dirección de rayo originaria por medio de un dispositivo de desvío 23. En este caso, se desplaza la posición del foco 16 según la óptica de enfoque 24 perpendicularmente a la dirección del rayo originaria. Con ello se puede mover el foco en una superficie, que fundamentalmente es plana y perpendicular a la dirección del rayo láser (dirección X/Y). el movimiento paralelo a la dirección del rayo (dirección Z) se puede realizar, por un lado, por medio del movimiento de la pieza de trabajo (ver flecha Z'). Los algoritmos de escaneado están diseñados entonces de tal manera que la pieza de trabajo sólo se ha de mover lentamente, y los movimientos de escaneado rápidos son realizados por la unidad de desvío. Por otro lado, la óptica de enfoque también se puede mover paralela a la dirección del rayo láser (flecha Z), para bajar con ello el foco en la dirección Z. En particular, en el caso de aplicaciones médicas se prefiere el segundo método, ya que el paciente por lo general no se puede mover suficientemente rápido.

55 El material mecanizado 90 se fija en relación al dispositivo láser en un dispositivo de fijación y ajuste 32. Preferentemente, en este caso se ajusta el dispositivo de fijación perpendicularmente y en paralelo a la dirección del rayo, para poder colocar el patrón de corte en la posición prevista en el material 90. Un rayo láser visible co-lineal con el rayo láser 15, 15' que se ha de mecanizar de un láser piloto 27 soporta en este caso el ajuste.

Para el guiado del rayo y para un ajuste fino de la posición del rayo entre los componentes individuales están previstos espejos y parejas de espejos 22. La constitución de los espejos se elige preferentemente de tal manera que el rayo láser que se ha de mecanizar no destruye éste, los espejos son altamente reflectantes para la longitud de onda del láser de mecanizado y suficientemente reflectantes para el láser piloto. Preferentemente, el

- 5 revestimiento se escoge de tal manera que el espejo no prolonga fundamentalmente la duración del láser. De modo especialmente preferido, al menos uno de los espejos será un denominado "chirped mirror", con el que se puede compensar la dispersión de todas las ópticas existentes en la trayectoria de los rayos, para conseguir un pulso corto óptimo en el foco de mecanizado.
- 10 En la Figura 2 se muestra otro ejemplo de realización del presente dispositivo de mecanizado láser con microscopio de operación. La construcción se corresponde fundamentalmente con la construcción de la Figura 1. Las mismas piezas están indicadas con los mismos símbolos de referencia. Como material 90 está previsto aquí un ojo humano. Se ha de describir ahora a modo de ejemplo este dispositivo láser de modo detallado, con el que se pueden realizar cortes precisos en la córnea del ojo humano. En este caso se ha de cortar una superficie en forma circular, que
- 15 sigue la curvatura de la córnea y que está centrada respecto al eje óptico del ojo, como pulsos láser fs dentro de la córnea. Por medio de una sección del borde en forma de segmento circular desde la superficie circular hasta la parte exterior de la córnea se origina un corte de la córnea (flap) que después del corte láser se ha de levantar hacia el lado.
- 20 Un corte de la córnea de este tipo sirve para la preparación de una operación LASIK, en la que por medio del desgaste del láser se varía el grosor de la córnea de tal manera que se compensan los errores refractivos del ojo. Hasta ahora, esa sección se realiza con un Keratom mecánico, que presupone una experiencia práctica en el médico, y que entraña ciertos riesgos. Adicionalmente, por medio de otra superficie circular curvada, que conjuntamente con la primera superficie circular del corte de córnea rodea una lentícula, que se puede retirar
- 25 después del levantamiento del corte de la córnea, se puede realizar en el mismo paso de trabajo una corrección refractiva de la córnea.

En la configuración especial de la invención se presiona el ojo por medio de un anillo de aspiración 32 con un cristal de contacto 31, que o bien es plano, o preferentemente está adaptado a la curvatura de la córnea

30 fundamentalmente. El anillo de aspiración está unido de modo fijo con la ventaja de salida del dispositivo láser, lo que se ocupa de que se dé una posición definida de la córnea en relación con el foco del láser. El rayo láser de femtosegundos ensanchado se enfoca con una óptica 24 en la córnea. Un divisor de rayos, que es altamente reflectante para las longitudes de onda del láser y transmite para luz visible, refleja el rayo láser en la trayectoria de los rayos de un microscopio de operación, que sirve para la observación y centrado del ojo. La óptica de enfoque 24

35 conforma en este caso una parte del objetivo del microscopio. Conjuntamente con una óptica concentrada se puede generar una imagen intermedia real de la córnea, que se puede observar espacialmente con el ocular estéreo 80. La unidad de desvío 23 desvía el rayo láser 15 ensanchado de esta manera de modo perpendicular respecto a su dirección de propagación. Con ello, el foco láser se puede orientar a diferentes puntos en la córnea. La profundidad de foco se puede variar por medio del desplazamiento de la óptica de enfoque 24 a lo largo del eje óptico o por

40 medio de la adaptación de la distancia focal de la óptica de enfoque.

Preferentemente, con la unidad de desvío se recorren bandas circulares. Para el corte de la superficie circular se reduce el radio circular de banda circular a banda circular, y se adapta la tasa de repetición de tal manera que se mantiene una distancia de spot unitaria. La profundidad de foco se adapta de banda circular a banda circular de tal

45 manera que la sección de la curvatura sigue la córnea. En caso de que se realicen correcciones de astigmatismo de la potencia visual (correctoras cilíndricas), entonces la profundidad del foco se puede mover durante la banda circular dos veces arriba y abajo, de manera que se origine una lentícula con parte de lente cilíndrica. Para el borde del corte de córnea, con un radio fijo, se desplaza la profundidad del foco desde el suelo del corte de córnea lentamente hasta la parte exterior de la córnea, de manera que se origina una superficie lateral del cilindro. En un

50 sector del círculo descrito con ello se ha de interrumpir el rayo láser, para dejar una "articulación" a la que se sujeta el corte de córnea preparado. Para ello se interrumpe simplemente el desacoplamiento de los pulsos láser de la fuente de rayos 11.

La fuente de rayos 11 es una fuente de rayos de femtosegundos con los parámetros descritos anteriormente, que

55 preferentemente se bombea por diodo directamente, y con ello es sencilla y fiable. El rayo láser 15 emitido se ensancha preferentemente con un telescopio Galilei a 1-2 cm de diámetro de rayo. De modo co-lineal respecto al rayo láser 15 ensanchado se solapa un rayo láser visible procedente de un láser piloto 27, que a continuación se escanea y se enfoca conjuntamente con el rayo láser de mecanizado. El divisor de rayo 57 es transparente para esta finalidad para la longitud de onda de láser de femtosegundos, y es reflectante para el rayo piloto.

La diversidad de las posibles figuras de corte depende ahora de los algoritmos de escaneado. En principio está indicado un dispositivo láser como se ha descrito para un gran número de aplicaciones (por ejemplo para correcciones refractivas de la potencia visual), en las que se han de llevar a cabo cortes o cambios de la estructura dentro de los componentes transparentes del ojo (córnea, lente, humor acuoso) y en las partes no transparentes como la esclerótica, iris, los cuerpos ciliares. Con ello, la propia invención sobrepasa incluso en este pequeño campo parcial de la aplicación ampliamente a las tecnologías existentes en universalidad y precisión (cuidado de los tejidos contiguos).

10 En la Figura 3 se muestran en las representaciones subordinadas 3 a a d ejemplos de aplicación de geometrías de corte, que se pueden realizar con el sistema láser conforme a la invención. Estas aplicaciones son sólo a modo de ejemplo – se puede realizar cualquier otra geometría. En el foco 16 del láser se deshace la cohesión del material 90 (fotodisrupción). Por lo general esto va unido con una evaporación local del material. Después de la actuación del pulso láser, en un pequeño volumen, la burbuja de cavitación (denominada también en lo sucesivo spot 16), la estructura de material se eleva de modo duradero o durante un espacio temporal que va al menos hasta el final de la duración de mecanizado. El empleo de un láser de femtosegundos fuertemente enfocado ofrece con ello la localización más precisa de la acción del láser. En el volumen de foco limitado de modo nítido se destruye la estructura del material, mientras que en las regiones contiguas (distanciadas ya menos de un micrómetro) por lo general no tiene lugar ninguna modificación del material. A partir de esto resulta una mayor precisión de mecanizado en el cuidado de regiones de material contiguas.

Para las secciones y estructuras se coloca un gran número de spots individuales, que separan la estructura del material, contiguamente de modo compacto. La distancia de los spots contiguos ha de estar al final del procedimiento en el orden de magnitud del diámetro del spot. En la figura 3 a se genera un volumen predeterminado (por ejemplo un taladro en el material) por medio del llenado completo del volumen que se ha de desgastar con spots 16 individuales. En el caso de un material no transparente de este tipo se parte en este caso capa a capa comenzando con la capa de spots opuesta al láser.

En la Figura 3 b se cubre ahora el borde del taladro con spots. En este caso se ha de mostrar un corte a través del material. Los spots 16 han de estar dispuestos con simetría de rotación alrededor del eje Z dibujado a trazos. De este modo se genera un núcleo de taladro en el centro del material 90 que se ha de mecanizar. El núcleo del taladro se puede retirar a continuación como pieza contigua. El número requerido de pulsos láser se reduce con ello, en particular, en el caso de grandes superficies de sección transversal del taladro de modo considerable en comparación con la Figura 3 a.

En la Figura 3 c se muestra un saliente en un material 90 transparente. Puesto que la radiación no es absorbida por el material 90, se pueden desprender del material piezas de material contiguas por medio de la colocación de spots en el borde de corte, cuando éste limite con la superficie.

En la Figura 3 d se muestra cómo en un material transparente, dependiendo de la constitución del material, se pueden generar espacios huecos o estructuras (por ejemplo modificación de las características ópticas).

Para figuras de corte macroscópicas (en el intervalo de centímetros) se requieren algunos millones de spots láser, incluso para cubrir sólo la superficie de corte (como en las Figuras 3 b y c) de modo suficientemente compacto con spots. Para muchas aplicaciones (en particular aplicaciones médicas), representa una ventaja el hecho de mantener en el menor valor posible el tiempo de mecanizado y de tratamiento. La fuente de rayos del dispositivo láser, así pues, según la invención es capaz de entregar pulsos láser con una elevada tasa de repetición. En la Figura 4 se muestra de modo esquemático una sección a partir de un posible patrón de escaneado, en la que los spots 16 mecanizados individualmente por los pulsos láser individuales están dispuestos a lo largo de bandas que son recorridas de modo continuado por el escáner. Para conseguir, con tasa elevadas de repetición de la fuente de rayos 11, una distancia de spot suficientemente grande, se mueve el foco en al menos una de tres dimensiones de escaneado muy rápidamente. Debido a ello, los algoritmos de escaneado se diseñan preferentemente de tal manera que los spots se colocan a lo largo de bandas, que se corresponden con los movimientos naturales de la unidad de desvío. El movimiento en las otras dos dimensiones se puede realizar entonces de modo relativamente lento. Las bandas naturales de la unidad de desvío pueden ser, por ejemplo, bandas circulares, que recorran las unidades desvío con frecuencias de circulación fijas. Esto se puede realizar, por ejemplo, por medio de elementos ópticos rotativos en la unidad de desvío. El radio de la banda circular y la profundidad del foco (dirección Z) son entonces magnitudes de escaneado que se pueden modificar lentamente. Esta variante es adecuada, en particular, cuando se han de generar figuras de sección con simetría de rotación. La tasa de repetición del láser se puede usar entonces

de modo especialmente efectivo cuando la frecuencia de circulación de las bandas circulares se escoge de tal manera que en las bandas circulares (B) mayores que se han de recorrer la tasa de repetición completa de la fuente de rayos lleva a la distancia de spot d deseada. En caso de que las bandas circulares, al recorrerse el patrón de corte, se hagan menores en el radio (A), entonces se puede reducir la tasa de repetición de la fuente de modo correspondiente, de manera que vuelva a resultar la distancia de spot óptima. Esta adaptación de la tasa de repetición es posible sin más en la fuente de rayo láser descrita. Una adaptación de la frecuencia de circulación a la tasa de repetición de la fuente puede ser difícil desde el punto de vista tecnológico, en particular cuando ésta se realiza de modo continuado para cada banda circular (A, B). Para una reducción del tiempo de mecanizado puede ser ventajosa, sin embargo, una adaptación de la frecuencia de circulación en pocos pasos a las bandas circulares más pequeñas.

En la Figura 5 se representan posibles secuencias de pulsos láser dentro y fuera de una disposición de amplificador de oscilador. La frecuencia de circulación de los pulsos láser en el oscilador 40 depende de la longitud del resonador, y está prefijada para una fuente de rayos determinada, y en el caso de longitudes de resonador de pocos metros tiene un valor en torno a 100 MHz. En la amplificación regenerativa aquí representada, se acoplan y se amplifican, por ejemplo, los pulsos 41 en el amplificador. En caso de que se desee una tasa de repetición menor, se realiza la amplificación de los pulsos 43. Una modificación de la tasa de repetición de los impulsos láser reforzados se puede realizar de esta manera de un modo sencillo.

La Figura 6 muestra una representación seccionada de la córnea 107 humana con la parte delantera 100 y la parte trasera 101. La lentícula 103 se conforma por medio de las dos secciones planas 104 y 105. Una pequeña sección 102 lateral, que lleva hasta la superficie delantera de la córnea 100 hace posible la extracción de la lentícula 103. Esta extracción está representada en la Figura 7. El espacio hueco restante colapsa 106.

La Figura 8 representa la córnea en la vista en planta desde arriba. Se puede reconocer el borde 111 de la lentícula 103, así como las secciones 102 que llevan a la superficie delantera de la córnea. A lo largo de la línea 110 se separa la superficie delantera de la córnea y se hace posible la extracción de la lente.

La Figura 9 representa una forma preferida del guiado de la sección. En este caso se ha dividido la lentícula en dos partes 123 y 124 por medio de una sección 122. En lugar de una única sección de extracción 110 se colocan aquí dos secciones de extracción 120 y 121. A continuación se retira la parte de la lente 123 a través de la sección de extracción 120 y la parte de la lente 124 a través de la sección de extracción 121.

La Figura 10 representa otra modalidad del procedimiento. En esta modalidad, la lentícula rodeada por el borde 111 se divide en muchos fragmentos 132 pequeños. Éstos pueden ser aspirados ahora con la ayuda de una cánula 133, que posee preferentemente un diámetro adaptado al tamaño de los fragmentos. Este proceso se puede apoyar por medio de un dispositivo de lavado a través de una segunda cánula 134, que se introduce en un canal opuesto o también el mismo canal. El agente de lavado 136, 135 es preferentemente una solución de sal común isotónica, pudiéndose emplear también otras soluciones. Este procedimiento realiza un debilitamiento mínimo de la córnea por medio de este método de la cirugía láser refractiva.

La invención se ha explicado a partir de ejemplos de realización preferidos. Las mejoras competentes no llevan a una pérdida del alcance de la protección definida por medio de las reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Dispositivo para el mecanizado preciso de material, en particular tejido orgánico, con
- un láser pulsado, en el que el láser proporciona longitudes de pulso entre 50 fs y 1 ps y una frecuencia
5 de pulsos de 100 kHz a 1 MHz, si bien no de 100 kHz, teniendo un valor la energía de los pulsos de rayo láser
individuales de 100 nJ a 5 µJ,
- dispositivos de sujeción para el posicionamiento y/o la fijación del material que se ha de mecanizar y
- un dispositivo de enfoque del rayo, que enfoca los pulsos de rayo láser en el interior del material,
- en el que el láser pulsado y el dispositivo de enfoque del rayo están conformados de tal manera que
10 los pulsos del rayo láser provocan en el foco dispuesto en el interior del material una fotodisrupción.
2. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 1, en el que están previstos otros dispositivos de rayos
para la conformación de rayos y/o el guiado de rayos y/o el desvío de rayos.
- 15 3. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 2, en el que los dispositivos de rayos se pueden
programar.
4. Dispositivo de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 2 a 3, en el que por medio de los
dispositivos de rayos se pueden aplicar los pulsos de rayos láser en formas que se pueden predeterminedinar
20 geométricamente en el transcurso temporal que se puede predeterminedinar en el material.
5. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 4, en el que los pulsos del rayo láser se pueden aplicar
por medio del dispositivo de desvío de rayos sobre el material, y durante eso se puede modificar la frecuencia del
pulso.
25
6. Dispositivo de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que el láser es un láser
de fibras.
7. Dispositivo de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que el láser es un láser
30 de disco.
8. Dispositivo de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que el láser es una
combinación de oscilador de láser de fibras y amplificador de láser de disco.

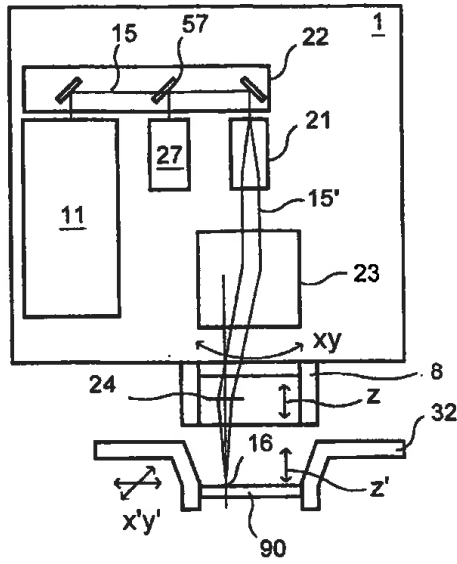


FIG. 1

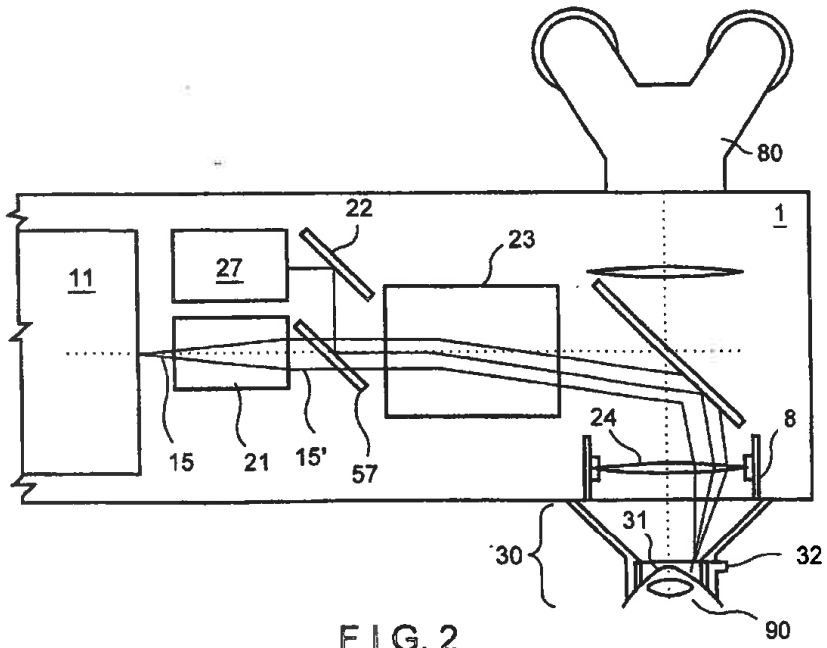
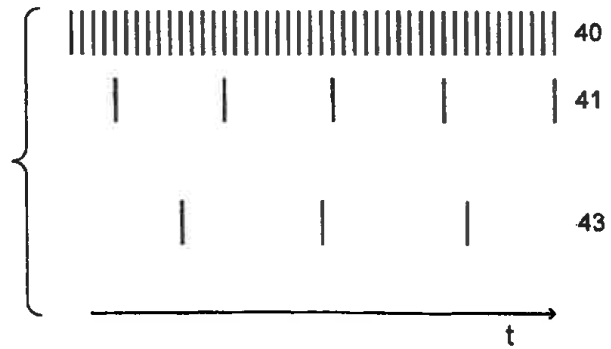
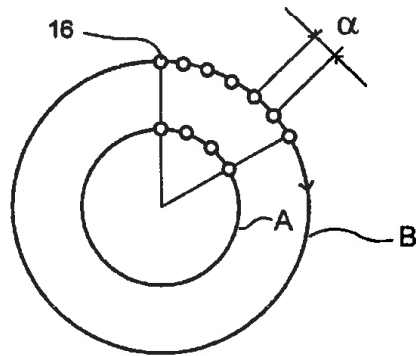
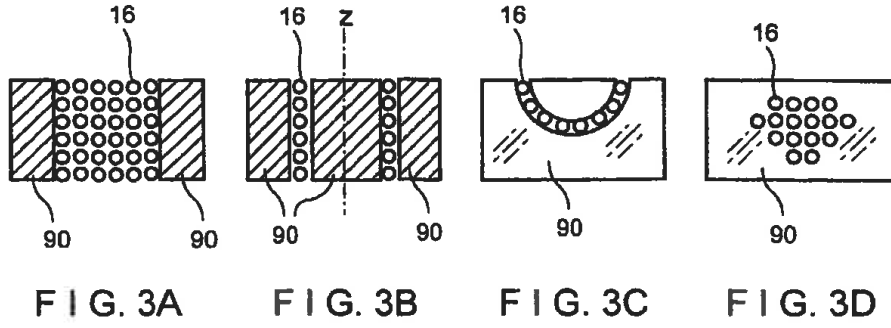


FIG. 2



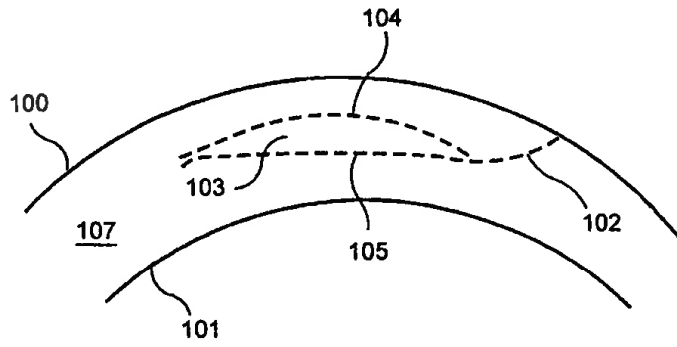


FIG. 6

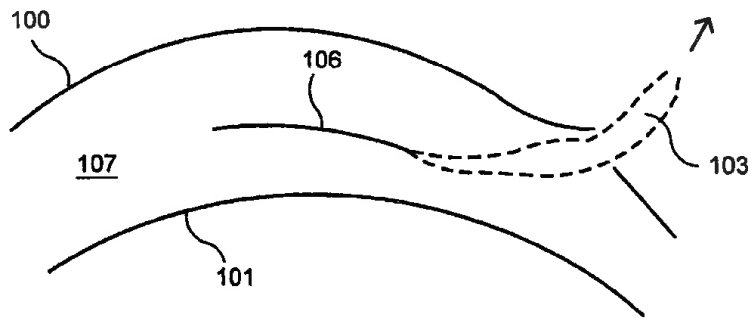


FIG. 7

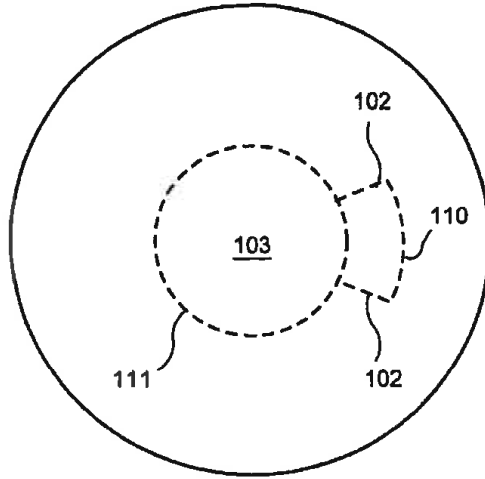


FIG. 8

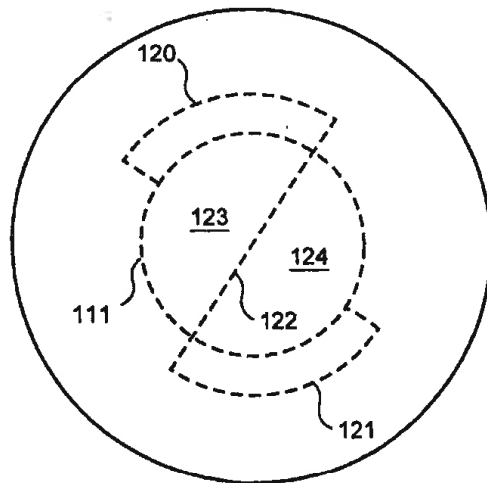


FIG. 9

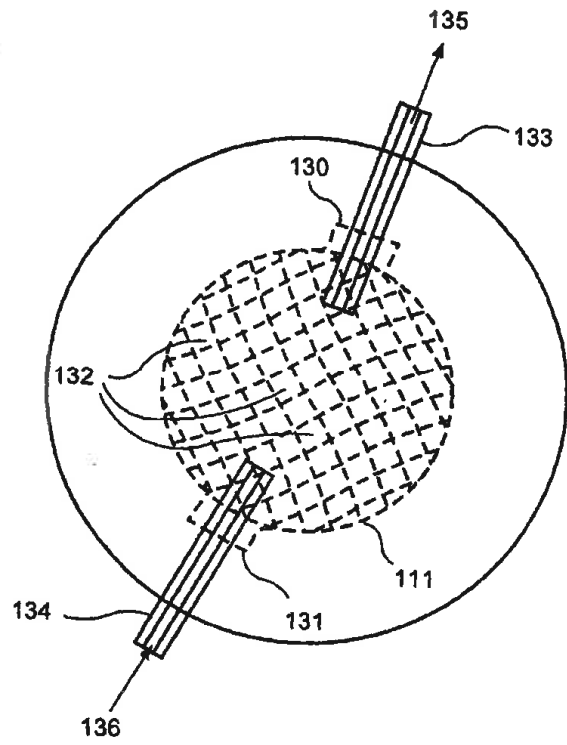


FIG. 10