

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 617 866**

51 Int. Cl.:

A61F 9/008 (2006.01)

A61F 9/01 (2006.01)

H01S 3/109 (2006.01)

H01S 3/13 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **18.11.2009 PCT/EP2009/008209**

87 Fecha y número de publicación internacional: **26.05.2011 WO2011060797**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.11.2009 E 09768494 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **21.12.2016 EP 2501348**

54 Título: **Dispositivo de tratamiento de material y procedimiento para su funcionamiento**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
20.06.2017

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

72 Inventor/es:
**WOITTENNEK, FRANZISKA;
WÖLFEL, MATHIAS;
VOGLER, KLAUS y
KITTELMANN, OLAF**

74 Agente/Representante:
LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 617 866 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 de tratamiento de material y procedimiento para su funcionamiento

5 La invención se refiere a un dispositivo para el tratamiento de un material con un rayo láser pulsado. La invención se refiere además a un procedimiento para el funcionamiento de un dispositivo de tratamiento de material de este tipo.

10 En principio, la invención puede aplicarse en el entorno de los sistemas láser, que sirven para tratar cualquier material. Por consiguiente, el material que va a tratarse puede ser materia muerta; sin embargo, también puede tratarse de materia viva, por ejemplo tejido de un ojo humano.

15 En el tratamiento de materiales, en particular aquellos materiales que son transparentes en la zona espectral visible, los denominados sistemas láser de femtosegundo están adquiriendo cada vez más importancia. A este respecto, se trata de sistemas láser que producen un rayo láser focalizado pulsado con duraciones de pulso en el intervalo de los femtosegundos. Este tipo de sistemas láser de femtosegundo encuentran aplicación por ejemplo en la cirugía láser oftalmológica, en la que se emplean habitualmente para producir cortes (incisiones) en el tejido corneal o en otras zonas de tejido del ojo humano. En el caso de los sistemas láser de femtosegundo resulta ventajoso el hecho de que son adecuados para producir en sí cualquier figura de corte tridimensional.

20 A continuación se explicará brevemente el proceso elemental principal en el tratamiento de materiales transparentes por medio de radiación láser de femtosegundo focalizada. Mediante la focalización intensa del rayo láser en el material y debido a la transparencia del material para la radiación, la potencia láser puede acoplarse en el interior sin que se dañe el material a través del que pasa la radiación (por ejemplo, tejido corneal) por encima del punto focal. La operación que tiene lugar en el punto focal, se denomina fotodisrupción. En el punto focal, debido a la radiación
25 de alta intensidad, se supera el umbral para la aparición de microplasma. Se produce la evaporación de una esfera de material muy pequeña de por ejemplo aproximadamente 1 μm de diámetro. Como consecuencia se produce una microburbuja con un diámetro algo mayor, por ejemplo de aproximadamente 5-12 μm , que separa el material circundante y a continuación difunde por completo al entorno. Por el tiempo de acción extremadamente corto por cada pulso láser no puede tener lugar ninguna conducción de calor al material circundante; todo el calor así como la
30 energía eficaz se disipa de nuevo tras desaparecer el plasma.

35 En los sistemas láser de femtosegundo habituales, el punto focal puede controlarse mediante un dispositivo de desviación (escáner) transversal y también longitudinalmente. En este caso, transversalmente significa una dirección en un plano que es ortogonal a la dirección de propagación del haz. Por el contrario, longitudinalmente significa una dirección a lo largo de la dirección de propagación del rayo láser. Si se disponen un número correspondiente (por ejemplo varios miles) de cavidades creadas por la descarga de plasma con la forma deseada de manera tridimensional unas junto a otras, entonces se produce el corte deseado en el material.

40 El procedimiento anterior requiere de un punto focal muy preciso con una intensidad pico elevada para realizar los cortes con la precisión deseada. Sin embargo, la capacidad de focalización y la intensidad pico son parámetros sensibles; ya perturbaciones comparativamente reducidas en el trayecto de propagación del rayo láser pueden afectar a la calidad espacial y temporal del rayo láser y con ello a su capacidad de focalización e intensidad pico. Por ello, durante el tratamiento de material es deseable monitorizar ininterrumpidamente (de manera continua o al
45 menos varias veces con intervalos de tiempo) la calidad temporal y espacial del rayo láser.

50 El documento US 2005/0163174 A1 describe un dispositivo y un procedimiento para producir rayos láser pulsados de armónicos de orden superior. El dispositivo comprende un láser para producir un rayo láser pulsado con una onda fundamental, que oscila dentro de un resonador óptico compuesto por dos espejos terminales. En la trayectoria del rayo del resonador óptico está dispuesto un cristal KTP (KTiOPO_4) para producir un rayo láser pulsado de un segundo armónico. También un espejo de salida de separador está dispuesto en la trayectoria del rayo del resonador óptico, que deja el rayo láser pulsado de la onda fundamental en la trayectoria del rayo del resonador óptico y extrae el rayo láser pulsado del segundo armónico del resonador óptico. El rayo láser pulsado del segundo armónico se dirige hacia una pieza de trabajo. La potencia láser del rayo láser pulsado de la onda fundamental se mide con un circuito de medición. Del mismo modo, la potencia láser del rayo láser pulsado del segundo armónico
55 se mide con un circuito de medición. Una unidad de control comprende unidades de ajuste y unidades de comparación. Las unidades de ajuste fijan valores de referencia. La unidad de comparación compara el valor de medición de la potencia láser del circuito de medición con un valor de referencia de la unidad de ajuste, mientras que la unidad de comparación compara el valor de medición de la potencia láser del circuito de medición con valores de referencia de la unidad de ajuste.

60 El documento EP 2 109 197 A1 describe un oscilador de láser de un dispositivo de tratamiento láser. El oscilador de láser comprende un resonador óptico que se forma por dos espejos de delimitación y que dentro de su trayectoria óptica del rayo comprende un medio activo, un cristal no lineal y un espejo de salida de separador. En el medio activo se produce un rayo de una onda fundamental, que se encierra entre los dos espejos de delimitación. El cristal no lineal produce un rayo de un segundo armónico en la trayectoria del rayo del resonador óptico como consecuencia de un proceso no lineal entre el cristal no lineal y el rayo de la onda fundamental. El rayo del segundo
65

armónico se separa con ayuda del espejo de salida de separador de la trayectoria del rayo del resonador óptico como rayo de salida, que irradia sobre una pieza de trabajo. Un circuito de medición de salida láser produce una señal eléctrica, que es representativa de la salida láser del rayo láser pulsado del segundo armónico. Una unidad de control compara esta señal con un valor de referencia de una unidad de ajuste.

5 El objetivo de la invención es proporcionar una solución para poder monitorizar la calidad de radiación de la radiación láser en un sistema láser que sirve para el tratamiento de material. Tal monitorización permitirá interrumpir el proceso de tratamiento en caso de empeorar la calidad de radiación o reaccionar de otro modo. En particular, la monitorización será posible en tiempo real, es decir, durante el tratamiento de material. La calidad de radiación se refiere en este caso en particular a la capacidad de focalización así como al desarrollo en el tiempo de la envolvente del impulso (envolvente temporal del pulso láser individual), es decir, la corta distancia de la duración de impulso. La capacidad de focalización se determina de manera decisiva por la calidad del perfil del rayo y el frente de onda de la radiación láser.

15 Este objetivo se alcanza mediante un dispositivo de tratamiento de material con las características de la reivindicación 1 y mediante un procedimiento para su funcionamiento con las características de la reivindicación 11.

El dispositivo según la invención sirve para tratar un material con un rayo láser pulsado y comprende:

20 - un láser para proporcionar el rayo láser,
 - una disposición de medición, para obtener valores de medición para una potencia de onda fundamental del rayo láser así como para una potencia de al menos un armónico de orden superior producido por multiplicación de frecuencia a partir del rayo láser,

25 - una unidad de evaluación unida con la disposición de medición, que está configurada para analizar la calidad del rayo láser en función de la potencia de onda fundamental medida, de la potencia medida del armónico de orden superior y de una potencia de radiación del láser ajustada.

30 La invención enseña a analizar procesos para detectar la calidad de radiación temporal y/o espacial de una radiación láser pulsada (en particular con pulsos de femtosegundos) o para detectar variaciones de esta calidad, dependiendo la eficiencia de los procesos de la intensidad de la radiación láser aplicada y focalizada. Las mezclas de frecuencia no lineales como el doblamiento de frecuencia son un ejemplo de estos procesos. A este respecto, en una configuración conveniente se focaliza una parte (pequeña) de la radiación láser en un cristal ópticamente no lineal y se convierte en radiación de frecuencia doble. Si se supone una longitud de onda del infrarrojo de la radiación láser del láser, entonces la parte de radiación focalizada en el cristal se convierte por ejemplo en luz verde. Como el doblamiento de frecuencia depende de manera cuadrática de la potencia incidente, la eficiencia de este proceso depende de la densidad de potencia aplicada (espacial y temporalmente) en el cristal y con ello, de la capacidad de focalización y de la duración de impulso de la radiación láser. Así, mientras puedan excluirse otros parámetros de influencia, puede atribuirse una variación de potencia de la luz con doblamiento de frecuencia a una variación en la capacidad de focalización y/o de la duración de impulso. Una variación de este tipo puede producirse por ejemplo por una afectación del frente de onda de la radiación láser o por un alargamiento de la duración de pulso.

45 Una conclusión de la invención es que, en general, resulta complejo y difícil monitorizar al mismo tiempo, uno al lado de otro, todos los parámetros que pueden influir de manera persistente en la calidad de la focalización (es decir, la capacidad de focalización). En cambio, la metodología según la invención permite un control de calidad sumario en tiempo real, es decir, por así decirlo en línea. Una vez que empeora alguno de estos parámetros que influyen en la producción del foco, esto puede detectarse a través de la señal de medición del armónico de orden superior y puede reaccionarse de manera correspondiente. Para el funcionamiento del dispositivo de tratamiento de material puede considerarse secundario qué parámetro concreto provoca un empeoramiento observado de la capacidad de focalización de los pulsos láser. Cuando la capacidad de focalización se ve afectada es recomendable interrumpir el tratamiento lo más rápido posible en el momento en que se superen determinados límites fijados. El monitorizar por separado cada parámetro de láser individual, relevante para una producción del foco efectiva y que puede empeorar la capacidad de focalización de la radiación láser, requería de un esfuerzo muy elevado. También sería extremadamente difícil implementar una reacción instantánea y fiable a una degradación de uno de estos parámetros. En cambio, la posibilidad proporcionada por la invención de una monitorización en línea sumaria de todos los parámetros de láser relevantes para la capacidad de focalización proporciona una ventaja considerable, porque el esfuerzo se reduce considerablemente.

60 En principio, en el marco de la invención también pueden emplearse procesos no lineales de orden superior; la idea principal de la invención no está limitada de ningún modo a un doblamiento de frecuencia. No obstante, para procesos de orden superior, por regla general son necesarias intensidades de radiación superiores, que pueden aumentar la complejidad de la solución según la invención.

65 El doblamiento de frecuencia óptico es un caso especial de la mezcla de 3 ondas, en la que para intensidades de campo elevadas a partir de dos ondas fundamentales con las frecuencias angulares ω_1 y ω_2 se produce una tercera

onda con la frecuencia angular $\omega_3 = \omega_1 \pm \omega_2$ ($\omega = 2\pi f$). A este respecto, $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ corresponde a la mezcla de frecuencias suma y $\omega_3 = \omega_1 - \omega_2$ a la mezcla de frecuencias diferencia. Si ahora, en el caso especial, del doblamiento de frecuencia $\omega_1 = \omega_2$, entonces sólo se produce una frecuencia suma $\omega_3 = 2\omega_1 = 2\omega_2$.

5 En una configuración práctica de la invención, una parte de la radiación láser se aplica en un medio ópticamente no lineal (por ejemplo, cristal). Preferiblemente, la parte aplicada de la radiación láser se focaliza en el medio no lineal. A consecuencia de la intensidad elevada en el foco se producen oscilaciones de portadores de carga en el medio no lineal, que también contienen armónicos de orden diferente de la oscilación fundamental (onda fundamental) irradiada. A este respecto, el segundo armónico representa la onda con frecuencia doblada con la frecuencia doble y
10 la mitad de la longitud de onda de la onda fundamental. Mediante la elección adecuada de la dirección de irradiación en el medio no lineal o mediante la orientación adecuada del medio no lineal con respecto a la dirección de propagación del haz puede preferirse la producción del segundo armónico frente a las demás frecuencias. Para la descripción teórica detallada de este proceso se remite a la literatura pertinente; en este punto puede prescindirse de una explicación más detallada.

15 La intensidad instantánea del segundo armónico, en el proceso anterior, es proporcional al cuadrado de la intensidad instantánea de la onda fundamental. A este respecto, de manera decisiva, la intensidad de la señal del segundo armónico se determina por la intensidad pico de la onda fundamental. Ésta depende a su vez de la energía de pulso, del tamaño del punto (radio de estrechamiento cuadrático) de la onda fundamental en el foco así como de la
20 duración de pulso de la radiación de onda fundamental. Después de que la eficiencia del doblamiento de frecuencia (eficiencia de conversión), que se define como cociente de la potencia promediada en el tiempo del segundo armónico con respecto a la potencia promediada en el tiempo de la radiación de onda fundamental, sea igualmente proporcional a la potencia de onda fundamental y con ello a la intensidad pico de la radiación de onda fundamental, para la eficiencia de conversión también vale una dependencia del tamaño del punto de la radiación de onda
25 fundamental en el punto focal y de su duración de pulso. Así, con una energía de pulso constante de la radiación de onda fundamental, una variación de la eficiencia de conversión permite concluir una variación de la calidad de haz temporal y/o espacial (envolvente de pulso, perfil del haz, etc.) y/o una variación de la forma del frente de onda y con ello una variación de la capacidad de focalización.

30 En una configuración preferida de la invención, la longitud de un cristal utilizado como medio ópticamente no lineal es significativamente mayor que la longitud de Rayleigh de la radiación de onda fundamental focalizada en el cristal. Entonces, ligeras variaciones en la divergencia de la radiación de onda fundamental (ligero desplazamiento del plano focal en el cristal doblador) prácticamente no influyen en la señal de intensidad del segundo armónico.

35 Además la radiación de onda fundamental se focaliza en el cristal de manera preferible con una distancia focal comparativamente corta, para reducir la dependencia del ajuste de fase de la dirección y la distribución espectral de la potencia aplicada en el cristal. Mediante la focalización de la radiación de onda fundamental aplicada se consigue que incluso en el caso de una ligera variación de la dirección de irradiación de la radiación de onda fundamental o de la longitud de onda media de la radiación de onda fundamental siempre existan proporciones de radiación
40 adecuadas, para el ajuste de fase. Así, puede obtenerse un intervalo angular comparativamente grande de la dirección de irradiación, para el cual puede obtenerse una señal de intensidad del segundo armónico al menos casi igual. Mientras que la fuente de láser trabaje dentro de sus especificaciones, según esto no influye en el procedimiento de medición o al menos sólo influye en el mismo en una medida reducida.

45 Si, en cambio, varía la duración de impulso y/o la capacidad de focalización por ejemplo a consecuencia de distorsiones del frente de onda de la radiación de onda fundamental, este efecto no se compensa; en su lugar influye directamente en la eficiencia de conversión. Con un cristal manchado introducido en la trayectoria del rayo de la radiación de onda fundamental pueden simularse por ejemplo distorsiones del frente de onda, en las que posiblemente se conserva la potencia de onda fundamental en su mayor parte o por completo. Como ya no pueden detectarse frentes de onda planos, entonces ya no puede conseguirse un buen foco, con lo que se debilita
50 enormemente el doblamiento de frecuencia o incluso llega a detenerse. Por consiguiente la variación de la potencia del segundo armónico se relaciona directamente con una variación del frente de onda de la radiación de onda fundamental. Por tanto, las distorsiones del frente de onda en el sistema láser pueden detectarse mediante monitorización de la potencia del segundo armónico (o de otro armónico de orden superior) y mediante comparación
55 de esta potencia con una potencia de referencia, que preferiblemente es representativa de la potencia del segundo armónico, que puede alcanzarse en el mejor de los casos con una potencia de onda fundamental dada. De este modo puede detectarse de manera muy sensible e instantánea, es decir, en tiempo real un empeoramiento de la calidad del rayo de la radiación de onda fundamental sin una pérdida considerable de potencia, y puede reaccionarse de manera correspondientemente rápida, antes de que puedan detectarse caídas mayores de
60 potencia.

Una manera de proceder a modo de ejemplo para, en tiempo real, monitorizar la calidad de rayo de un rayo láser de tratamiento proporcionado por un sistema láser, puede consistir en realizar inicialmente una operación de calibración en la que el láser se ajusta a diferentes potencias de radiación (nominales) dentro de su intervalo de potencias
65 posible y con cada potencia de radiación ajustada se mide la potencia de onda fundamental así como la potencia del segundo armónico (u otro armónico de orden superior). A este respecto, la operación de calibración se realizará en

un estado del sistema láser libre de perturbaciones con la mejor capacidad de focalización de la radiación de onda fundamental. De este modo puede conseguirse que los valores de medición para la potencia de onda fundamental así como para la potencia del armónico de orden superior representen valores máximos u óptimos. Estos valores máximos representan las potencias de la onda fundamental y del armónico de orden superior que pueden alcanzarse como máximo con la potencia de radiación del láser ajustada en cada caso.

Además mediante la formación del cociente (potencia del segundo armónico dividida entre la potencia de onda fundamental) puede determinarse un valor para la eficiencia de conversión en asociación con cada potencia de radiación del láser ajustada.

Los datos obtenidos en el marco de la operación de calibración pueden almacenarse por ejemplo en forma de cuadro en una memoria.

Durante el tratamiento de material posterior, a su vez, de manera continua o con intervalos de tiempo, se miden la potencia de onda fundamental así como la potencia del armónico de orden superior. Entonces pueden realizarse dos etapas de comprobación por separado. En una primera etapa de comprobación puede comprobarse la potencia de onda fundamental medida con un valor de referencia. Este valor de referencia se determina a partir de los datos almacenados en la memoria, obtenidos en el marco de la operación de calibración. Representa el valor óptimo de la potencia de onda fundamental con la potencia de radiación del láser ajustada. En caso de que la potencia de onda fundamental medida no se desvíe de manera importante con respecto al valor de referencia o se encuentre dentro de unos límites permitidos fijados con respecto al valor de referencia, entonces esto significa que al menos no existen perturbaciones, que puedan afectar a la potencia del rayo láser de manera significativa. Sin embargo, si existe una desviación mayor que un límite permitido fijado, entonces esto puede ser un motivo para desencadenar una reacción de aviso o emergencia predeterminada, que por ejemplo puede incluir la emisión de una indicación de aviso y/o una desconexión del láser.

Además, en una segunda etapa de comprobación puede compararse la potencia medida del armónico de orden superior con un valor de referencia y/o puede compararse la eficiencia de conversión (cociente a partir de potencia medida del armónico de orden superior y potencia de onda fundamental medida) con un valor de referencia. También los valores de referencia para la potencia del armónico de orden superior o la eficiencia de conversión se determinan a partir de los datos de calibración almacenados; indican valores teóricos (valores óptimos) para la potencia del armónico de orden superior o la eficiencia de conversión con la potencia de radiación del láser ajustada de manera nominal, es decir, en el punto de trabajo del láser. En caso de que la comparación dé como resultado una desviación más allá de unos límites fijados, puede desencadenarse una reacción de aviso o emergencia, como se explicó anteriormente. Si, por el contrario, tanto la primera como la segunda etapa de comprobación (que evidentemente no tienen que realizarse necesariamente en este orden) no dan como resultado desviaciones inadmisibles, puede permitirse la emisión del rayo láser y el funcionamiento del dispositivo de tratamiento de material puede continuar libremente.

Con la segunda etapa de comprobación se consigue, en particular, detectar aquellas perturbaciones que no provocan ningún debilitamiento de potencia del rayo láser o sólo provocan un debilitamiento reducido aunque dan lugar a distorsiones del frente de onda significativas. En el caso de perturbaciones del frente de onda no deseadas, la relación de potencia del segundo armónico medida con respecto a la máxima puede disminuir fácilmente hasta un porcentaje reducido (por ejemplo, por debajo del 15 por ciento), lo que demuestra que la potencia del segundo armónico es un buen indicador para la calidad de rayo de un rayo láser.

Según perfeccionamientos preferidos del dispositivo de tratamiento de material según la invención, el al menos un armónico de orden superior puede comprender el segundo armónico, y la duración de pulso del rayo láser se encuentra preferiblemente en el intervalo de los femtosegundos.

La unidad de evaluación puede estar configurada para comparar al menos uno de los valores de medición de potencia y/o un valor derivado de los mismos (por ejemplo, la eficiencia de conversión) con al menos un valor de referencia y, en función de la magnitud de una desviación del valor de medición o del valor derivado con respecto al valor de referencia, provocar una reacción predeterminada. A este respecto, el valor de referencia puede representar un valor que puede alcanzarse como máximo con la potencia de radiación del láser ajustada para la potencia de onda fundamental, la potencia del armónico de orden superior o una eficiencia de conversión de la multiplicación de frecuencia.

Además, la unidad de evaluación puede estar configurada para extraer el valor de referencia de informaciones de referencia almacenadas de antemano, que en asociación con una pluralidad de diferentes potencias de radiación del láser ajustadas representan valores de referencia para la potencia de onda fundamental y/o la potencia del armónico de orden superior y/o una eficiencia de conversión de la multiplicación de frecuencia. Alternativa o adicionalmente, la unidad de evaluación puede estar configurada para determinar un cociente a partir de la potencia medida del armónico de orden superior y de la potencia de onda fundamental medida y/o un cociente a partir de la potencia medida del armónico de orden superior y un valor de referencia para la potencia del armónico de orden superior y analizar la calidad de rayo en función del cociente determinado.

Además, la unidad de evaluación puede formar parte de una disposición de control electrónica que está configurada para, en función de la magnitud de la desviación del valor de medición o del valor derivado con respecto al valor de referencia, controlar la emisión del rayo láser. Por ejemplo, puede permitir la emisión del rayo láser, en caso de que la desviación determinada se encuentre dentro de unos límites predeterminados, y/o puede impedir la emisión del rayo láser, en caso de que la desviación determinada se encuentre fuera de estos límites.

Para producir el armónico de orden superior la disposición de medición comprende un medio ópticamente no lineal así como una unidad de focalización dispuesta aguas arriba de este medio para focalizar un rayo parcial desacoplado del rayo láser sobre el medio no lineal. Además, puede estar configurada para medir como potencia de onda fundamental la potencia de un rayo parcial desacoplado del rayo láser.

La unidad de evaluación puede formar parte de una disposición de control electrónica que está configurada para, en un proceso de calibración, ajustar sucesivamente una pluralidad de diferentes potencias de radiación del láser, en asociación con cada potencia de radiación del láser ajustada determinar valores de medición para la potencia de onda fundamental y la potencia del armónico de orden superior y almacenar los valores de medición determinados y/o los valores derivados de los mismos en una memoria en asociación con las diferentes potencias de radiación del láser.

El procedimiento según la invención para hacer funcionar un dispositivo de tratamiento de material que trabaja con un rayo láser pulsado comprende:

- medir una potencia de onda fundamental del rayo láser y una potencia de al menos un armónico de orden superior producido por multiplicación de frecuencia a partir del rayo láser,
- comparar al menos uno de los valores de medición de potencia y/o un valor derivado de los mismos con al menos un valor de referencia,
- provocar una reacción predeterminada en función de la magnitud de una desviación del valor de medición o del valor derivado con respecto al valor de referencia.

Además, el procedimiento puede comprender realizar antes un proceso de calibración, en el que se obtienen valores de medición para la potencia de onda fundamental y la potencia del armónico de orden superior en una pluralidad de diferentes potencias de radiación ajustadas de un láser que proporciona el rayo láser y se almacenan los valores de medición obtenidos y/o los valores derivados de los mismos en una memoria en asociación con las diferentes potencias de radiación del láser, obteniéndose el valor de referencia a partir de los valores de medición y/o valores derivados almacenados en la memoria.

La reacción predeterminada puede comprender una comunicación óptica y/o acústica y/o una liberación o una desconexión del rayo láser. Además, las etapas de medir y comparar pueden realizarse de manera repetida, en particular con intervalos de tiempo regulares, durante el tratamiento de un material con el rayo láser. De este modo, es posible por así decirlo, una monitorización en línea en tiempo real, dependiendo la frecuencia de monitorización del intervalo de tiempo con el que se realizan las mediciones. A este respecto no hay ningún límite fijado por la invención, es decir, la medición puede realizarse tantas veces como permitan los aparatos de medición y la potencia de cálculo disponible.

A continuación se explicará la invención en más detalle mediante el único dibujo adjunto. Su figura 1 muestra esquemáticamente un ejemplo de realización de un dispositivo de tratamiento de material para el tratamiento con láser de un material. El dispositivo de tratamiento de material designado en general con 10 sirve, en el caso de ejemplo mostrado, para el tratamiento con cirugía láser de un ojo humano 12 y aquí, por ejemplo, para la realización de cortes de tejido intracorneales. Comprende una fuente de láser 14, que produce un rayo láser pulsado 16 con duraciones de pulso en el intervalo de los femtosegundos. La fuente de láser 14 comprende por ejemplo un láser de fibra. Por lo demás el dispositivo de tratamiento de material 10 comprende una óptica de focalización 18 para focalizar el rayo láser 16 sobre el objeto que va a tratarse, en este caso, el ojo 12. La óptica de focalización 18 está formada, por ejemplo, por un objetivo F-Theta. Dispuesto aguas arriba de la óptica de focalización 18 hay un escáner 20, que sirve para el control transversal y longitudinal de la posición del foco del rayo láser 16. Para la desviación transversal, el escáner 20 puede comprender por ejemplo un par de espejos controlados de manera galvanométrica o un cristal de desviación controlado eléctricamente. Para el control longitudinal del foco el escáner 20 puede comprender por ejemplo un elemento óptico que influye en la divergencia del rayo láser 16, por ejemplo una lente desplazable longitudinalmente en la dirección de propagación del haz o una lente líquida con una capacidad refractiva variable o un espejo deformable. Se entiende que los componentes del escáner 20 responsables del control transversal del foco y del control longitudinal del foco del rayo láser 16 pueden estar dispuestos en diferentes puntos a lo largo de la dirección de propagación del rayo láser 16. Por consiguiente, el escáner 20 no tiene que ser una unidad compacta; puede tratarse de una disposición distribuida de diferentes componentes de escáner.

Para el control de la fuente de láser 14 y del escáner 20 está prevista una unidad de control 22 basada en microprocesador que trabaja según un programa de control almacenado en una memoria 24. El programa de control incluye parámetros de control adecuados (por ejemplo en forma de coordenadas para las posiciones de disparo individuales de los pulsos láser), que determinan la geometría de corte que va a producirse.

5 Para producir cortes finos y precisos por medio del rayo láser 16 se desea una calidad espacial y temporal elevada del rayo. Para la monitorización en tiempo real de la calidad de rayo del rayo láser 16, el dispositivo de tratamiento de material 10 presenta medios para desacoplar dos rayos parciales 16', 16'' en la dirección de propagación del haz antes de la desviación transversal del escáner, del rayo láser 16. En el caso de ejemplo mostrado, estos medios comprenden dos espejos divisores 26, 28 semitransparentes dispuestos uno detrás de otro en la trayectoria del rayo del rayo láser 16. Un primer medidor de potencia 30 sirve para medir la potencia de radiación (promediada en el tiempo) del rayo parcial 16'. El medidor de potencia 30 comprende para ello por ejemplo un fotodiodo y proporciona a la unidad de control 22 una señal representativa de la potencia de radiación medida, en particular proporcional a la misma. La potencia medida por el medidor de potencia 30 corresponde a una potencia de onda fundamental en el sentido de la invención.

20 El segundo rayo parcial 16'' se focaliza por medio de una lente de focalización 32 sobre un cristal ópticamente no lineal 34 (u otro medio no lineal), en el que mediante procesos no lineales se produce un rayo con frecuencia doblada 16''', que a continuación, mediante un filtro óptico paso banda 36 se libera de posibles líneas secundarias perturbadoras así como restos de la onda fundamental. Un segundo medidor de potencia 38, que a su vez puede incluir por ejemplo un fotodiodo para la detección de radiación, sirve para medir la potencia (promediada en el tiempo) del rayo con frecuencia doblada 16''' y proporciona a la unidad de control 22 una señal representativa de la potencia medida. La potencia medida del rayo con frecuencia doblada 16''' representa una potencia de un armónico de orden superior (en este caso, segundo armónico) producido a partir de la onda fundamental en el sentido de la invención.

30 La longitud de onda del rayo láser 16 producido por la fuente de láser 14 se encuentra por ejemplo en el intervalo de infrarrojos entre 1000 y 1100 nm. Así, mediante doblamiento de frecuencia, en el cristal no lineal 34 se forma un rayo de luz 16''' de color verdoso a amarillento-verdoso.

La unidad de control 22, a partir de las señales de medición de potencia proporcionadas por los medidores de potencia 30, 38, calcula una eficiencia de conversión, dividiendo la potencia medida del rayo de luz 16''' entre la potencia medida del rayo parcial 16'.

35 En la memoria 24 están depositados adicionalmente datos de calibración que se determinaron por la unidad de control 22 en un proceso de calibración anterior. Los datos de calibración indican para diferentes valores nominales de la potencia de radiación del láser 14 en cada caso un valor de referencia para la potencia del rayo parcial 16', para la potencia del rayo con frecuencia doblada 16''' así como para la eficiencia de conversión. Las diferentes potencias de radiación del láser 14 corresponden a diferentes puntos de trabajo. El láser 14 puede hacerse funcionar en un intervalo de potencias de radiación; según el caso de aplicación, la unidad de control 22 puede ajustar un punto de trabajo diferente del láser 14. Por ejemplo, las diferentes potencias de radiación están representadas por valores porcentuales que definen el respectivo punto de trabajo mediante una indicación porcentual referida a una potencia de radiación que puede ajustarse como máximo del láser 14. Los valores de referencia almacenados se refieren en cada caso a una situación óptima, es decir, un funcionamiento libre de perturbaciones sin distorsiones del frente de onda del rayo láser 16 no deseadas (o al menos sin distorsiones importantes) y sin un debilitamiento de potencia del rayo láser 16 no deseado (o al menos sin un debilitamiento importante) a lo largo de su trayecto de propagación. Por consiguiente representan valores que pueden alcanzarse en el mejor de los casos para la potencia del rayo parcial 16', la potencia del rayo con frecuencia doblada 16''' y la eficiencia de conversión.

50 Los valores de potencia medidos actualmente para el rayo parcial 16' y el rayo con frecuencia doblada 16''' se utilizan por la unidad de control 22 para, mediante una comparación con los datos de calibración almacenados en la memoria 24, analizar la calidad de rayo del rayo láser 16. Concretamente, la unidad de control 22 comprueba si la potencia medida del rayo parcial 16' corresponde al menos aproximadamente al valor de referencia almacenado en la memoria 24 para la potencia de onda fundamental en el punto de trabajo en cuestión del láser 14. De este modo la unidad de control 22 puede detectar debilitamientos de potencia no deseados del rayo láser 16 con respecto al caso libre de perturbaciones.

60 Además, la unidad de control 22 comprueba si la potencia medida del rayo con frecuencia doblada 16''' corresponde al menos aproximadamente al valor de referencia contenido en los datos de calibración almacenados para la potencia del segundo armónico en el punto de trabajo en cuestión del láser 14. Alternativa o adicionalmente, la unidad de control 22 comprueba si la eficiencia de conversión calculada (calculada como cociente de la potencia medida del rayo de luz 16''' y de la potencia medida del rayo parcial 16') corresponde al menos aproximadamente al valor de referencia contenido en los datos de calibración para la eficiencia de conversión en el punto de trabajo en cuestión del láser 14. La comprobación de los valores de potencia medidos o de la eficiencia de conversión derivada de los mismos con correspondencia a los valores de referencia almacenados puede comprender por ejemplo una formación de diferencia y/o una formación de cociente. Después de que los valores de referencia indiquen valores

- óptimos, que pueden alcanzarse con un funcionamiento libre de perturbaciones del dispositivo de tratamiento de material 10 con una capacidad de focalización óptima del rayo láser 16, las posibles desviaciones entre las potencias medidas o la eficiencia de conversión calculada con respecto a los valores de referencia son un indicador de debilitamientos de potencia no deseados y/o distorsiones del frente de onda no deseadas y/o alargamientos de duración de pulso no deseados del rayo láser 16. En caso de que las desviaciones determinadas superen una magnitud fijada, entonces la unidad de control 22 podrá interrumpir la emisión del rayo láser 16.
- 5
- El proceso de calibración mencionado puede realizarse automáticamente por la unidad de control 22, por ejemplo cada vez que se conecte el dispositivo de tratamiento de material 10 o cuando un usuario introduzca una orden de inicio adecuada para la realización de la calibración. En el marco del proceso de calibración automático, la unidad de control 22 puede ajustar sucesivamente diferentes puntos de trabajo del láser 14 y almacenar en la memoria 24 los valores de medición determinados en cada caso para la potencia de onda fundamental y la potencia del segundo armónico.
- 10
- Para focalizar el segundo rayo parcial 16", en lugar de la lente 32 puede utilizarse por ejemplo también un elemento óptico de difracción. El medio no lineal 34 puede ser por ejemplo un cristal de polarización periódica. El cristal puede estar estabilizado respecto a la temperatura, pudiendo optimizarse el ajuste de fase a través de la temperatura. Además es posible trabajar según el método de ajuste de fase no crítico en sí conocido en la técnica.
- 15

REIVINDICACIONES

1. Dispositivo para el tratamiento de un material con un rayo láser pulsado (16), que comprende
- 5 - un láser (14) para proporcionar el rayo láser (16),
- una disposición de medición (30, 32, 34, 36, 38), para obtener valores de medición para una potencia de onda fundamental del rayo láser así como para una potencia de al menos un armónico de orden superior producido por multiplicación de frecuencia a partir del rayo láser, comprendiendo la disposición de medición para producir el
- 10 armónico de orden superior un medio ópticamente no lineal (34) así como una unidad de focalización (32) dispuesta aguas arriba de este medio para focalizar un rayo parcial (16") desacoplado del rayo láser (16) sobre el medio no lineal,
- caracterizado por que además comprende
- 15 - una unidad de evaluación (22) unida con la disposición de medición, que está configurada para analizar la calidad del rayo láser (16) en función de la potencia de onda fundamental medida, de la potencia medida del armónico de orden superior y de una potencia de radiación del láser (14) ajustada.
- 20 2. Dispositivo según la reivindicación 1, en el que el al menos un armónico de orden superior comprende el segundo armónico.
3. Dispositivo según la reivindicación 1 o 2, en el que la unidad de evaluación (22) está configurada para
- 25 comparar al menos uno de los valores de medición de potencia y/o un valor derivado de los mismos con al menos un valor de referencia y, en función de la magnitud de una desviación del valor de medición o del valor derivado con respecto al valor de referencia, provocar una reacción predeterminada.
4. Dispositivo según la reivindicación 3, en el que el valor de referencia representa un valor que puede
- 30 alcanzarse como máximo con la potencia de radiación del láser (14) ajustada para la potencia de onda fundamental, la potencia del armónico de orden superior o una eficiencia de conversión de la multiplicación de frecuencia.
5. Dispositivo según la reivindicación 3 o 4, en el que la unidad de evaluación (22) está configurada para
- 35 extraer el valor de referencia de informaciones de referencia almacenadas de antemano, que en asociación con una pluralidad de diferentes potencias de radiación del láser (14) ajustadas representan valores de referencia para la potencia de onda fundamental y/o la potencia del armónico de orden superior y/o una eficiencia de conversión de la multiplicación de frecuencia.
6. Dispositivo según una de las reivindicaciones 3 a 5, en el que la unidad de evaluación (22) está configurada
- 40 para determinar un cociente a partir de la potencia medida del armónico de orden superior y de la potencia de onda fundamental medida y/o un cociente a partir de la potencia medida del armónico de orden superior y un valor de referencia para la potencia del armónico de orden superior y analizar la calidad de rayo en función del cociente determinado.
7. Dispositivo según una de las reivindicaciones 3 a 6, en el que la unidad de evaluación (22) forma parte de
- 45 una disposición de control electrónica que está configurada para, en función de la magnitud de la desviación del valor de medición o del valor derivado con respecto al valor de referencia, controlar la emisión del rayo láser.
8. Dispositivo según una de las reivindicaciones anteriores, en el que la disposición de medición está
- 50 configurada para medir como potencia de onda fundamental la potencia de un rayo parcial (16') desacoplado del rayo láser (16).
9. Dispositivo según una de las reivindicaciones 3 a 8, en el que la unidad de evaluación (22) forma parte de
- 55 una disposición de control electrónica que está configurada para, en un proceso de calibración, ajustar sucesivamente una pluralidad de diferentes potencias de radiación del láser (14), en asociación con cada potencia de radiación del láser (14) ajustada determinar valores de medición para la potencia de onda fundamental y la potencia del armónico de orden superior y almacenar los valores de medición determinados y/o los valores derivados de los mismos en una memoria (24) en asociación con las diferentes potencias de radiación del láser (14).
10. Dispositivo según una de las reivindicaciones anteriores, en el que la duración de pulso del rayo láser (16)
- 60 se encuentra en el intervalo de los femtosegundos.
11. Procedimiento para hacer funcionar un dispositivo para el tratamiento de un material con un rayo láser pulsado (16), que comprende
- 65 - medir una potencia de onda fundamental del rayo láser (16) y una potencia de al menos un armónico de orden superior producido por multiplicación de frecuencia a partir del rayo láser, desacoplándose para producir el armónico

de orden superior un rayo parcial (16") del rayo láser (16) y focalizándose por medio de una unidad de focalización (32) sobre un medio ópticamente no lineal (34),

5 caracterizado por que se analiza la calidad del rayo láser (16) comparando al menos uno de los valores de medición de potencia y/o un valor derivado de los mismos con al menos un valor de referencia, y

- provocando una reacción predeterminada en función de la magnitud de una desviación del valor de medición o del valor derivado con respecto al valor de referencia.

10 12. Procedimiento según la reivindicación 11, que comprende además realizar antes un proceso de calibración, en el que se obtienen valores de medición para la potencia de onda fundamental y la potencia del armónico de orden superior en una pluralidad de diferentes potencias de radiación ajustadas de un láser (14) que proporciona el rayo láser y se almacenan los valores de medición obtenidos y/o los valores derivados de los mismos en una memoria (24) en asociación con las diferentes potencias de radiación del láser (14), obteniéndose el valor de referencia a partir de los valores de medición y/o valores derivados almacenados en la memoria.

15 13. Procedimiento según la reivindicación 11 o 12, en el que la reacción predeterminada comprende una comunicación óptica y/o acústica y/o una desconexión o una liberación del rayo láser.

20 14. Procedimiento según una de las reivindicaciones 11 a 13, en el que las etapas de medir y comparar se realizan de manera repetida, en particular con intervalos de tiempo regulares, durante el tratamiento de un material con el rayo láser.

FIG 1

