

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **3 013 117**

51 Int. Cl.:

B23K 26/53 (2014.01)

B23K 26/03 (2006.01)

B28D 5/00 (2006.01)

B23K 26/064 (2014.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **07.08.2018 PCT/GB2018/052256**

87 Fecha y número de publicación internacional: **14.02.2019 WO19030520**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.08.2018 E 18758682 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.02.2025 EP 3664955**

54 Título: **Método de mecanizado por láser de materiales interiores**

30 Prioridad:

07.08.2017 GB 201712639

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
11.04.2025

73 Titular/es:

**OXFORD UNIVERSITY INNOVATION LIMITED
(100.00%)
Buxton Court, 3 West Way
Oxford, Oxfordshire OX2 0JB, GB**

72 Inventor/es:

**BOOTH, MARTIN JAMES y
SALTER, PATRICK**

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 3 013 117 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

Método de mecanizado por láser de materiales interiores

- 5 La invención se refiere a un método de mecanizado por láser de materiales interiores, en particular, un método de formación de una región modificada dentro de una muestra.

Antecedentes

- 10 El mecanizado por láser es un proceso muy utilizado en la industria. Los avances de la investigación en este campo durante la última década han llevado el procesamiento por láser a escalas de longitud mucho más pequeñas. Esto ha sido posible gracias al uso de láseres pulsados con duraciones de pulso de cientos de femtosegundos a unos pocos picosegundos y enfocados a través de lentes de alta apertura numérica. La combinación del confinamiento de la energía en las dimensiones temporal y espacial conduce a intensidades focales instantáneas elevadas que crean modificaciones del material mediante procesos ópticos no lineales. Por lo tanto, los efectos del procesamiento pueden limitarse a regiones focales.

- 15 Por lo tanto, es deseable mejorar el control sobre el tamaño y la forma de los focos láser dentro de un material para mejorar el grado de control que ofrecen las técnicas de mecanizado por láser. Sin embargo, la presencia de un material en la trayectoria de un haz láser afecta necesariamente al láser (por ejemplo, por refracción y/o reflexión). Por consiguiente, cuando se intenta enfocar dentro de un material, el propio material interrumpe el enfoque del láser dentro de sí mismo.

- 20 El documento US 2006/196858 A1 divulga un método y un aparato para marcar con láser indicios en el volumen de piedras preciosas tal como los diamantes, estando formados los indicios por una pluralidad de marcas microscópicas en forma de puntos cuya acumulación puede iniciarse exponiendo los defectos o impurezas internos que se producen de forma natural en el volumen de una piedra preciosa a un tren de pulsos láser fuertemente enfocados. El documento US 2011/0266261 A1 divulga un dispositivo de mecanizado por láser que puede suprimir la aberración de un haz láser convergente en un objeto a mecanizar.

- 25 Sumario

- 30 De acuerdo con un primer aspecto de la presente invención se proporciona un método para la modificación por láser de una muestra para formar una región modificada en una ubicación objetivo dentro de la muestra, que comprende: posicionar una muestra en un sistema láser para su modificación mediante un láser; medir la inclinación de una superficie de la muestra a través de la cual se enfoca el láser; utilizar al menos la inclinación medida para determinar una corrección a aplicar a un elemento óptico activo del sistema láser; aplicar la corrección al elemento óptico activo para modificar las propiedades de frente de onda del láser para contrarrestar un efecto de coma en el enfoque del láser; y modificar por láser la muestra en la ubicación objetivo utilizando el láser con las propiedades de frente de onda corregidas para producir la región modificada.

- 35 La luz enfocada desde una lente objetiva hacia una muestra estará aberrada con respecto a su foco ideal debido a la refracción en la superficie de la muestra. Cuanto mayor sea la diferencia entre los índices de refracción del medio de inmersión (por ejemplo, aire, aceite, etc.) y la muestra, mayor será el efecto aberrante sobre el foco. Por lo tanto, la corrección determinada tiene en cuenta los efectos de la refracción en la superficie de la muestra para contrarrestar el efecto aberrante destructivo de la muestra. Diferentes factores pueden contribuir a diferentes tipos de aberraciones (o modos de aberración) en el enfoque. Una superficie inclinada con respecto a una lente objetiva de enfoque no permitirá normalmente un enfoque ideal, sino que distorsionará el enfoque por aberración de coma. Normalmente, la superficie incidente se nivela en la medida de lo posible y se acepta la distorsión resultante, pero para algunas aplicaciones (por ejemplo, enfocar dentro de una piedra preciosa) puede ser difícil obtener una superficie perfectamente nivelada, o puede ser ventajoso enfocar a través de una superficie inclinada. Por lo tanto, midiendo la inclinación de la muestra, sus efectos sobre el enfoque pueden contrarrestarse mediante la corrección aplicada al elemento óptico activo, y puede mejorarse la eficacia del enfoque.

- 40 El método de corrección de aberraciones divulgado puede conseguir un enfoque láser dentro de la muestra que tenga una relación de Strehl superior a 0,5. El método puede incluir la modificación de la muestra utilizando un foco láser con una relación de Strehl superior a 0,5. El foco puede tener una relación de Strehl superior a 0,8, superior a 0,7, superior a 0,8 o superior a 0,9. La relación de Strehl puede entenderse como una medida de lo cerca que está un foco de su foco ideal (*es decir*, limitado por difracción). Un enfoque láser limitado únicamente por la difracción inherente del sistema de enfoque (*es decir*, un enfoque láser del tamaño del límite de difracción) tendría una relación de Strehl de 1. En la práctica, los defectos inherentes a un sistema óptico darán lugar a un enfoque que no sea del tamaño del límite de difracción y que, por tanto, tendrá una relación de Strehl inferior a 1. Una relación de Strehl de aproximadamente 0,1 es típica para un láser enfocado a, por ejemplo, una profundidad de 100µm en una muestra de diamante para una lente de alta NA. Por lo tanto, la relación de Strehl puede entenderse como una medida del efecto de la aberración en un foco láser, siendo las relaciones más cercanas a 1 las menos afectadas por las aberraciones y los defectos del sistema, también puede entenderse como una medida de la eficacia de un foco determinado.

La relación de Strehl puede definirse como la intensidad focal máxima en relación con la que existe cuando no hay aberraciones presentes en el sistema. Cuando un foco simplemente limitado por difracción tiene una intensidad pico I_0 y un sistema real tiene una intensidad pico I_p la relación de Strehl se define como la relación I_p/I_0 . Si hay aberraciones en un sistema, los errores de frente de onda difractan la luz lejos del foco y reducen la intensidad pico real I_p del máximo teórico I_0 , reduciendo así la relación de Strehl. Si el error de frente de onda se caracteriza como una función de fase de aberración φ , la relación de Strehl S viene dada por:

$$S = \frac{I_p}{I_0} = \langle \langle e^{i\varphi} \rangle \rangle^2$$

donde los paréntesis angulares $\langle \dots \rangle$ denotan un promedio sobre una apertura particular en el sistema óptico, tomada aquí como la apertura de pupila de la lente objetivo de enfoque. Para un sistema perfecto, el error de frente de onda es cero (fase plana) y la relación de Strehl es 1. Si el error de frente de onda aumenta debido a la aberración, la relación de Strehl disminuye. La función de aberración describe todos los errores de fase relacionados con la propagación de la luz hacia el foco, y puede escribirse como una suma de polinomios de Zernike, tal como coma primario, esférico primario y astigmatismo primario. La función de aberración puede componerse alternativamente como una suma de otro conjunto de funciones de base, o como un cálculo numérico directo/solución analítica para una ubicación de enfoque particular dentro de una muestra conocida.

El método puede comprender la medición de un enfoque del láser dentro de la muestra, por ejemplo mediante fotoluminiscencia dentro de la muestra, y la modificación de la corrección aplicada al elemento óptico activo basándose en el enfoque medido para mejorar así la eficacia del enfoque y/o aumentar la relación de Strehl del enfoque.

La muestra puede comprender una superficie plana a través de la cual incidirá la luz láser y que provocará la aberración.

Una región modificada puede ser cualquier región dentro de la muestra que haya sufrido cambios debido a la exposición al láser. Normalmente, una región modificada tendrá propiedades diferentes y podrá tener propiedades ópticas, estructurales, mecánicas, eléctricas, etc. diferentes de las del material a granel que la rodea.

Un elemento óptico activo es cualquier elemento que pueda modificar dinámicamente las propiedades de la luz que incide sobre el mismo. Por ejemplo, los moduladores espaciales de luz (SLM), los espejos deformables (o microespejos deformables) y las lentes adaptativas son elementos ópticos activos que pueden utilizarse para imponer dinámicamente modulaciones que varían espacialmente en el perfil de un haz láser para controlar así, *por ejemplo*, sus propiedades de fase y/o propagación.

La medición de la inclinación de la muestra puede incluir la medición de la inclinación de la superficie de la muestra con respecto a la propagación del haz láser, y/o puede incluir la medición de la inclinación (es decir, inclinación) con respecto a ambas direcciones horizontales (es decir, las dos dimensiones ortogonales transversales a la propagación del haz láser). La medición de la inclinación de la muestra puede incluir la medición de la inclinación de la superficie de la muestra desde un plano transversal de la lente objetivo. Por lo tanto, la medición de la muestra proporciona información sobre las aberraciones que afectarán al enfoque del sistema. La medición puede realizarse por cualquier medio adecuado, y puede incluir la reflexión desde la superficie de la muestra. La medición puede incluir la reflexión desde una pluralidad de puntos de la superficie incidente de la muestra.

La medición puede realizarse por formación de imágenes. La posición axial correcta para un enfoque óptimo (es decir, la imagen más nítida) de la superficie de la muestra puede encontrarse en tres lugares diferentes. La precisión axial puede ser de 0,5 μm . Los tres puntos pueden estar separados en sentido transversal unos 0,2 mm. La distancia de separación puede ser lo suficientemente grande como para realizar una medición precisa de la inclinación, dado el rango de inclinaciones que se espera que sean importantes. Por ejemplo, para la inclinación del diamante en el rango superior a 0,5 grados puede tener efectos significativos sobre la calidad de un enfoque dentro de la muestra.

Se pueden utilizar otros métodos para realizar la medición, si el sistema utiliza un objetivo de inmersión en aceite, se puede utilizar un método similar para realizar la misma medición que la anterior, pero en lugar de utilizar el enfoque más nítido para determinar la posición axial de la superficie de la muestra (lo que puede ser un problema con algunas muestras, ya que la superficie puede estar pulida, por lo que no hay nada claro que visualizar), se puede utilizar el láser para hervir el aceite de inmersión. Es decir, cuando el foco láser está dentro del aceite de inmersión, hierve el aceite, y cuando el foco láser se mueve dentro de la muestra no se ve nada. En este caso, la energía del pulso estaría por debajo del umbral de fabricación dentro de la muestra. Este enfoque tiene aproximadamente la misma precisión axial que el enfoque por imágenes, pero puede ser más fácil de aplicar en algunos casos. Sin embargo, sólo funciona con lentes de base oleosa.

Otro método para medir la ubicación axial de la superficie de la muestra se basa en la reflexión de la superficie. Puede proceder del propio láser de fabricación (cuando la energía del pulso está por debajo del umbral de fabricación) o de una fuente de luz alternativa (por ejemplo, un láser o un LED). La superficie de la muestra puede localizarse cuando la señal reflejada es máxima.

5 Otro método consiste en observar la generación del tercer armónico (THG) de la superficie de la muestra, que se maximiza cuando la superficie está en el foco de la lente. Se puede utilizar una medición interferométrica con la luz reflejada para obtener una medición muy precisa de la posición de la superficie (se necesitaría una fuente coherente alternativa para el interferómetro).

10 Otro método alternativo consiste en obtener imágenes de la reflexión del haz láser de la superficie del diamante en una cámara, el desplazamiento transversal de la reflexión en la cámara permite determinar la inclinación de la muestra a partir de una única medición.

15 La determinación de la corrección a aplicar al elemento óptico activo utiliza al menos la inclinación medida, también puede incluir la determinación de una corrección basada en la profundidad de la región a modificar por debajo de la superficie de la muestra. La determinación de una corrección puede incluir el uso de información relativa a las propiedades ópticas del material de la muestra para tener en cuenta la refracción.

20 El método puede incluir la modificación por láser de la muestra para formar características visibles.

El método puede comprender la medición de la posición de la muestra dentro del sistema láser; la utilización también de la posición medida para determinar la corrección que debe aplicarse al elemento óptico activo del sistema láser; y la aplicación de la corrección al elemento óptico activo para modificar las propiedades de frente de onda del láser a fin de contrarrestar un efecto de aberración esférica en el enfoque del láser. El método puede comprender la medición de la posición de la superficie de la muestra sobre la que incide el láser para determinar una profundidad de enfoque. El método puede comprender además la determinación de la corrección basándose, al menos en parte, en la profundidad de enfoque.

30 Por lo tanto, como corregimos el coma causado por la inclinación de la muestra, la corrección puede tener en cuenta la aberración esférica. La aberración esférica es otro tipo de aberración además del coma. La aberración esférica puede ser proporcional a la profundidad de enfoque. La aberración esférica distorsiona un punto de enfoque en forma de cúspide y, al hacerlo, desplaza un pico de intensidad del foco axialmente hacia la superficie aberrante y lo aleja de su posición ideal. Por lo tanto, un foco afectado por la aberración esférica tendrá un pico de intensidad más cercano a la superficie de la muestra. Este movimiento del enfoque también se conoce como desenfoque. Midiendo la posición de la muestra, puede determinarse la corrección para contrarrestar los efectos de la aberración esférica. El método puede comprender el cambio de la posición axial de la muestra para tener en cuenta el movimiento de la intensidad del pico del foco. El método puede comprender el cambio de la posición axial de la muestra para tener en cuenta un componente de desenfoque de la aberración esférica.

35 Por lo tanto, el método puede incluir la aplicación de una única corrección del frente de onda para tener en cuenta los efectos tanto del coma como de la aberración esférica causada por la refracción en la superficie de la muestra.

45 El método puede comprender la medición de la muestra después de formar la región modificada, y la modificación de la corrección aplicada al elemento óptico activo basándose en la medición adicional. El método puede comprender la medición de la región modificada de la muestra y la modificación de la corrección basándose en la medición de la región modificada. Por lo tanto, el método puede incluir una etapa de retroalimentación durante la cual la corrección aplicada al elemento óptico activo se refina, por ejemplo, para controlar más estrechamente el tamaño y la forma del foco, y reducir aún más los efectos de la aberración (por ejemplo, coma y/o aberración esférica) en el foco. El perfeccionamiento de la corrección puede lograr una mayor relación de Strehl. La medición adicional puede utilizar excitación de fotoluminiscencia no lineal que puede proceder de defectos intrínsecos de la muestra. El método puede comprender la detección de los efectos sobre la muestra de la modificación láser mediante fotoluminiscencia, emisión o absorción de plasma, o propiedades de reflexión o transmisión.

55 La etapa de determinar una corrección puede comprender el cálculo de la corrección sobre la marcha, si puede comprender el uso de la inclinación medida en el cálculo para corregir el coma y, en su caso, la posición medida para corregir la aberración esférica. De este modo, puede calcularse una corrección adaptada para cada muestra.

60 La etapa de determinar una corrección puede comprender la selección de la corrección de una base de datos de correcciones disponibles. Por lo tanto, el método puede incluir la selección de una corrección específica que se aplicará al elemento óptico activo cuando, por ejemplo, la inclinación de la muestra se encuentre dentro de un intervalo predeterminado, y/o la posición de la muestra se encuentre dentro de un intervalo predeterminado. La base de datos puede comprender una pluralidad de correcciones, cada una para un rango predeterminado de factores.

65 La corrección puede definirse mediante una expansión de modos ortogonales. Cada modo puede definir un modo de

aberración. La corrección puede ser un modo puro o una superposición de modos. La corrección puede definirse mediante un polinomio de Zernike o mediante una expansión de polinomios de Zernike.

5 La corrección puede comprender un campo de fase para modular un perfil de rayo láser a un perfil deseado. Por ejemplo, el método puede utilizar un modulador espacial de luz (SLM) y la corrección puede representar un campo de visualización para un SLM. El método puede utilizar un espejo deformable (DM) y la corrección puede ser una configuración para el espejo deformable. La corrección puede ser una configuración para una lente adaptativa.

10 La etapa de determinar una corrección puede basarse, al menos en parte, en una energía de pulso del láser. Por lo tanto, la corrección puede tener en cuenta el coma horizontal y vertical, la aberración esférica y la energía del pulso. La energía del pulso puede seleccionarse en función de la corrección. El método puede comprender la determinación de una energía de pulso a utilizar basada en la corrección y la muestra, y puede incluir la modificación de la muestra utilizando un pulso láser de la energía de pulso determinada.

15 Si la corrección es suficiente, puede utilizarse la misma energía de pulso para fabricar en cualquier lugar de la muestra y obtener el mismo resultado. Este es el caso típico para los rangos de aberración considerados en esta divulgación. Sin embargo, si la corrección no es suficiente (por ejemplo, si el elemento óptico activo carece del alcance o los grados de libertad suficientes para mostrar con precisión la fase necesaria para contrarrestar la aberración), puede aumentarse la energía del pulso.

20 Si la corrección no es suficiente, puede aumentarse la energía del pulso para la fabricación. Si la aberración es considerable y la corrección dista mucho de ser suficiente para contrarrestarla por completo, la energía del pulso puede aumentar considerablemente. En algunos materiales (por ejemplo, particularmente en el diamante) si la corrección es insuficiente, no es posible fabricar con precisión y fiabilidad por muy elevada que se eleve la energía del pulso. Por ejemplo, a una profundidad de unos 25 Qpm en diamante, incluso si la aberración esférica está perfectamente corregida pero no lo está una pequeña aberración de coma (*por ejemplo*, de aproximadamente 1 rad), no se observa experimentalmente la fabricación con láser de pulso único. La energía del pulso puede ser muy alta y aún así la fabricación no se puede lograr con un solo pulso, en tal caso, la fabricación no se puede lograr de forma determinista. En cambio, hay que aumentar la dosis (es decir, el número de pulsos por región modificada) y la fabricación resultante es grande (por ejemplo, superior a 5 μm) y poco definida. Además, la dosis requerida variará de forma impredecible en distintos puntos del diamante.

25 La determinación de la corrección puede comprender la optimización de una función predeterminada. El método puede comprender el uso de un algoritmo para determinar la corrección basándose en diversos factores relativos a la muestra en cuestión. Los factores pueden ser el coma, la aberración esférica y la energía del pulso. La determinación de la corrección puede comprender la selección de una corrección deseada a partir de un espacio de búsqueda tridimensional, un espacio de búsqueda cuatridimensional o un espacio de búsqueda superior basado en factores que incluyen cualquier combinación de coma vertical, coma horizontal, aberración esférica y energía de pulso. El método puede incluir la minimización de una función de coste (y/o la maximización de una función de mérito).

30 El método puede incluir la modificación simultánea de regiones espacialmente separadas dentro de la muestra. El método puede incluir la modificación consecutiva de regiones separadas dentro de la muestra utilizando la misma energía de pulso para modificar cada región.

35 La etapa de aplicar la corrección al elemento óptico activo puede comprender el cambio de una visualización del elemento óptico activo. El elemento óptico activo puede ser un SLM, un DM, o una lente adaptativa (*por ejemplo*, fluidica o acusto-óptica) u otro elemento óptico adaptativo transmisivo o reflectante. El método puede comprender el envío de una señal al elemento óptico adaptativo que incluya datos que definan la corrección, y hacer que el SLM o DM altere su estado para imponer la corrección sobre un perfil de haz láser incidente.

40 El método puede comprender la modificación por láser de la muestra utilizando una pluralidad de rayos láser y una matriz de focos. El método puede comprender la modificación simultánea de regiones espacialmente separadas de la muestra utilizando rayos láser respectivos. El método puede comprender el uso de una pluralidad de pulsos, cada pulso de un rayo láser respectivo con el fin de modificar regiones deseadas de la muestra. El método puede incluir la formación de la pluralidad de haces antes de la corrección por el elemento óptico adaptativo y, por lo tanto, el método puede incluir el uso de un único elemento óptico adaptativo para realizar la corrección de la aberración en una pluralidad de haces láser espacialmente separados. El método puede incluir la creación de la pluralidad de haces láser utilizando el elemento óptico adaptativo, de forma que la corrección de la aberración y la generación de múltiples haces sean simultáneas.

45 La etapa de formar una región modificada puede incluir el uso de interacciones ópticas no lineales para provocar la modificación del material. El método puede comprender la modificación únicamente del material dentro de la masa de la muestra. Por lo tanto, el método puede incluir no modificar una superficie de la muestra. El método puede incluir la modificación de la muestra a una profundidad de más de 50 micrómetros, o más de 150 micrómetros, o más de 300 micrómetros.

El método puede comprender la formación de estructuras complejas dentro de la muestra. Por ejemplo, el método puede comprender la formación dentro de la muestra de una matriz de características. El método puede comprender el movimiento de la muestra durante la modificación láser para crear una característica de línea dentro de la muestra que puede ser recta o curva o de cualquier forma adecuada. El método puede comprender el barrido del láser durante la modificación láser para crear una característica de línea dentro de la muestra que puede ser recta o curva o de cualquier forma adecuada. El método puede comprender la formación de un volumen óptico formado por puntos espaciados, y/o puede comprender la formación de un elemento difractivo. El método puede comprender hacer visibles características dentro de la muestra. El método puede comprender la formación de una estructura dentro de la muestra. El método puede comprender la formación de una característica a gran escala, por ejemplo superior a 5 micrómetros, o superior a 20 micrómetros, en al menos una dimensión. El método puede incluir la modificación de regiones predeterminadas de la muestra para generar un campo de tensión deseado dentro de la muestra. El método puede incluir la creación de características dentro de la muestra que cambien la fase de la luz incidente, características que pueden ser visibles mediante microscopía de contraste de fase, o que pueden dispersar la luz de modo que las características puedan ser visibles en microscopía de campo oscuro. El método puede incluir la modificación del índice de refracción de la muestra en una región predeterminada, y puede lograrlo exponiendo esa región al láser, o exponiendo regiones próximas al láser para cambiar un campo de deformación de la región predeterminada para modificar su índice de refracción.

El método puede comprender el uso de una lente de alta apertura numérica (NA) para enfocar el láser dentro de la muestra. Esto puede exacerbar los efectos de la aberración esférica. El método puede comprender el uso de una lente objetivo sin medio de inmersión (*es decir*, una lente seca), o puede comprender el uso de una lente objetivo con medio de inmersión (*por ejemplo*, aceite). El método puede comprender el uso de una lente objetivo con una apertura numérica superior a 0,5 aproximadamente. El método puede comprender el uso de una lente objetivo con una apertura numérica superior a 0,8 aproximadamente. El método puede comprender el uso de una lente objetivo de más de 0,8 NA si está seca, o de más de 1,2 NA si está en inmersión en aceite.

El método podría utilizarse para marcar la piedra preciosa, *por ejemplo*, como dispositivo de seguridad.

El método puede comprender la creación de conductores eléctricos dentro de la muestra, en particular diamante. El diamante puede ser un sustrato de diamante cultivado. El método puede comprender el recubrimiento de la muestra (*por ejemplo*, diamante) en metal, por ejemplo, para proporcionar conexiones eléctricas a conductores eléctricos dentro de la muestra. El método puede comprender la conversión del carbono de una fase sp³ a una fase sp², modificando así la estructura del diamante. El método puede incluir la modificación de una región dentro del diamante que se encuentra con la superficie del diamante.

La corrección puede definirse mediante una expansión de modos ortogonales. Cada modo puede definir un modo de aberración. La corrección puede ser un modo puro o una superposición de modos. La corrección puede definirse mediante un polinomio de Zernike o mediante una expansión de polinomios de Zernike. La corrección de fase puede definirse como una superposición de modos utilizando una base ortogonal distinta de los polinomios de Zernike. La corrección de fase puede ser una solución analítica, por ejemplo, para una geometría determinada, o una solución numérica para una geometría de enfoque determinada. La corrección de fase podría determinarse mediante una optimización iterativa utilizando un método de retroalimentación focal. La corrección de fase puede definirse como una superposición de modos utilizando una base ortogonal distinta de los polinomios de Zernike. La corrección de fase puede ser una solución analítica, por ejemplo, para una geometría determinada, o una solución numérica para una geometría de enfoque determinada. La corrección de fase podría determinarse mediante una optimización iterativa utilizando un método de retroalimentación focal.

El método puede comprender el cálculo de los coeficientes de una expansión de Zernike para caracterizar los modos de aberración y determinar una corrección. La aplicación de la corrección al elemento óptico activo puede comprender la aplicación de una superposición de modos de Zernike al mismo. La amplitud de los modos de Zernike puede definirse mediante la corrección. La corrección puede ser de un solo modo o una superposición de modos.

La corrección puede contrarrestar los efectos sobre el enfoque de un modo de aberración de inclinación causado por la muestra, cuyo modo de aberración de inclinación es distinto del modo de aberración de coma causado por la inclinación de la muestra. Los distintos modos de aberración se caracterizan por los diferentes órdenes de cambio de fase que provocan. El modo de aberración de inclinación se caracteriza por un orden de cambio de fase diferente al del coma. El modo de aberración esférica se caracteriza por un orden de cambio de fase diferente al del coma y la inclinación. La determinación de una corrección puede comprender la determinación de los modos de aberración que la muestra introducirá en el foco láser.

Por ejemplo, una aberración de inclinación puede describirse en la pupila del sistema óptico como una variación de fase proporcional a $r \cos(\theta - \xi)$ donde (r, θ) son las coordenadas polares en el plano de la pupila y ξ representa la orientación de la inclinación. Una aberración de coma tiene componentes de la forma $r^3 \cos(\theta - \xi)$ donde la fase varía con la tercera potencia de la coordenada radial. También pueden aparecer términos radiales de orden superior con potencias impares.

5 El método puede comprender el uso de un láser pulsado con energías de pulso de entre 10 nJ y 300 nJ. Las energías de los pulsos pueden oscilar entre 80 nJ y 150 nJ. La energía del pulso puede ser superior al umbral de modificación del material de la muestra. El método puede incluir el uso de un láser con longitud de onda en los espectros UV, visible o infrarrojo. El método puede incluir el uso de un láser con una longitud de onda en el espectro infrarrojo cercano.

10 El método puede comprender la modificación por láser de la muestra utilizando un único pulso láser. El método puede comprender la modificación de la muestra mediante una pluralidad de pulsos. El pulso puede ser de femtosegundo o de picosegundo. El método puede incluir la variación de la energía del pulso entre las dosis.

15 El método puede comprender la modificación de una región de menos de 1 micrómetro en la dirección de propagación. El método puede comprender la modificación de una región de menos de 1 micrómetro en cada una de las direcciones x, y y z.

20 Según otro aspecto de la invención se proporciona un método para la modificación por láser de una piedra preciosa para formar una región modificada en una ubicación objetivo dentro de la piedra preciosa, que comprende: posicionar una piedra preciosa en un sistema láser para su modificación por un láser; medir un enfoque del láser dentro de la piedra preciosa; utilizar al menos la medición del enfoque para determinar una corrección a aplicar a un elemento óptico activo del sistema láser; aplicar la corrección al elemento óptico activo para modificar las propiedades de frente de onda del láser para contrarrestar un efecto de aberración sobre el enfoque del láser; y modificar por láser la piedra preciosa en la ubicación objetivo utilizando el láser con las propiedades de frente de onda corregidas para producir la región modificada.

25 La aplicación de la corrección al elemento óptico activo puede dar como resultado un enfoque láser con una relación de Strehl superior a 0,5, superior a 0,6, superior a 0,7, superior a 0,8 o superior a 0,9. De este modo, los efectos de la aberración en el enfoque del láser pueden reducirse considerablemente. La corrección puede contrarrestar la aberración esférica y/o la aberración de coma.

30 También se describe aquí una muestra modificada por cualquiera de los métodos descritos anteriormente.

35 La muestra a granel puede ser de diamante. La muestra puede comprender conductores eléctricos. La región modificada puede incluir un código de seguridad. La región modificada puede comprender una rejilla de difracción. La región modificada puede ser inferior a 1 micrómetro en todas las dimensiones (*es decir*, menos de 1 micrómetro en anchura, altura y profundidad). La región modificada puede estar a más de 100 micrómetros por debajo de la superficie más cercana de la muestra, preferiblemente a más de 200 micrómetros, y más preferiblemente a más de 500 micrómetros.

De acuerdo con otro aspecto de la invención, se proporciona un sistema láser como se indica en la reivindicación 13.

40 El elemento óptico activo puede estar configurado para modificar las propiedades de frente de onda del láser para contrarrestar un efecto de coma en el enfoque del láser. El elemento óptico activo puede estar configurado para modificar las propiedades de frente de onda del láser para contrarrestar un efecto de aberración esférica en el enfoque del láser. El elemento óptico activo puede estar configurado para modificar las propiedades de frente de onda del láser para contrarrestar un efecto de aberración en el enfoque del láser por refracción en la superficie de la muestra.

45 Lista de figuras

50 Realizaciones de la invención se describen a continuación, a modo de ejemplo solamente y con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

Las figuras 1A, 1B, 1C, 1D muestran una pista gráfica escrita en el interior de un sustrato de diamante desde diferentes perspectivas;

55 La figura 2A muestra un ejemplo esquemático de un foco distorsionado dentro de un sustrato sin utilizar corrección de aberraciones;

La figura 2B muestra un ejemplo esquemático de un enfoque dentro de un sustrato conseguido mediante corrección de aberraciones;

60 Las figuras 3A y 3B muestran características escritas en un sustrato de diamante; el conjunto de características de la izquierda se escribió utilizando una técnica de corrección de aberraciones, mientras que el conjunto de características de la derecha se escribió sin utilizar una técnica de corrección de aberraciones; y

65 La figura 4 muestra un sistema láser ejemplar para la modificación por láser de una muestra.

Descripción detallada de realizaciones

5 A continuación se describe un sistema y un método para el procesamiento por láser con alta resolución en el interior de materiales transparentes que incorporan corrección de aberraciones para compensar los efectos de refracción en la superficie del material. El sistema utiliza la retroalimentación de las mediciones del material para optimizar la corrección de la aberración y la intensidad focal con el fin de obtener el nivel necesario de modificación del material. Una aplicación particular es la fabricación de características en el interior del diamante.

10 Las aplicaciones del método divulgado incluyen la generación de guías de luz en el interior de vidrios mediante el aumento local del índice de refracción. Pueden crearse estructuras similares en cristales tales como KDP o niobato de litio utilizando aumentos localizados del índice de refracción causados por campos de tensión alrededor de pistas dañadas en el medio. Los dispositivos microfluídicos pueden crearse mediante la exposición del vidrio seguida de un grabado químico. La fotopolimerización no lineal puede utilizarse para crear complejas estructuras poliméricas tridimensionales a partir de soluciones adecuadas.

15 El método divulgado puede utilizarse para crear regiones modificadas dentro de un material que tengan aproximadamente el mismo tamaño que un foco láser de difracción limitada, que puede ser inferior a 1 micrómetro en todas las dimensiones.

20 Fabricación en diamante

25 Cuando los láseres pulsados de femtosegundos se enfocan fuertemente en el interior del diamante, las interacciones ópticas no lineales modifican la red cristalina de diversas maneras, dependiendo de la densidad de energía en el foco. A bajas energías, se produce una pequeña alteración de la red cristalina que puede utilizarse para generar centros de color foliando el recocido. A energías más altas, se produce una alteración significativa de la red hasta el punto de que se produce una conversión significativa del carbono de la fase sp³ (estructura cristalina del diamante) a la fase sp² (grafito). Normalmente, las regiones modificadas por láser adoptan la forma de carbono amorfo, que es una combinación de las fases sp² y sp³. La fabricación de características ópticas finas en diamante utiliza láseres de pulso corto y lentes de objetivo de alta apertura numérica (NA). De este modo se garantiza que las características queden bien confinadas en tres dimensiones dentro del material y que no se produzcan daños en la superficie del material.

30 Una sola exposición láser puede crear una característica puntiforme de material modificado. Las estructuras complejas, que pueden ser bidimensionales o tridimensionales, pueden construirse mediante colecciones de elementos puntuales. Alternativamente, las estructuras lineales pueden estar compuestas por elementos muy próximos entre sí.

35 Existen dos regímenes para el procesamiento láser subsuperficial dentro del diamante: (i) a muy baja energía de pulso, la interacción altamente no lineal genera un conjunto de vacantes de red en el foco del láser, mientras que (ii) a energías de pulso más altas, se produce la ruptura de la red de diamante dejando una fase gráfitica conductora. Las modificaciones del Régimen (i) son invisibles por microscopía de transmisión y sólo pueden verse en un microscopio de fluorescencia. Son un precursor importante para la formación de centros NV (vacantes de nitrógeno) coherentes para aplicaciones cuánticas. Las modificaciones del régimen (ii) comprenden pequeños polvos (<varios 100 nm) de carbono enlazado sp² acompañados de microfisuras en la red de diamante. El trazado del diamante a través del foco láser en el Régimen (ii) permite la escritura de pistas continuas de carbono enlazado sp² que pueden utilizarse como cables conductores de la electricidad.

45 Los rasgos formados sin traslación del diamante durante la exposición adoptan la forma de un elipsoide. El alcance de la modificación es mayor a lo largo de la dirección de propagación del láser de fabricación y depende de la NA (apertura numérica) de la lente objetivo utilizada. El tamaño de los rasgos también depende de la energía de pulso utilizada y de la dosis (número de pulsos en la exposición). Si el frente de onda está bien corregido como se describe en el presente documento, se pueden realizar modificaciones muy regulares de una exposición a otra. Si el frente de onda no está bien corregido como se describe en el presente documento, pueden producirse modificaciones muy irregulares (en tamaño y forma) a partir de diferentes exposiciones con las mismas condiciones.

50 Las ópticas de alta NA ($NA > \sim 0,8$) se utilizan para la fabricación tanto de características que no se extienden axialmente ($< 2 \mu\text{m}$ a lo largo del eje óptico) como para la fabricación fiable de punto a punto. La fabricación con una NA inferior ($\sim 0,5$) puede ser posible, pero depende en gran medida de la posición y es inconsistente. A mayor NA, la fabricación es altamente repetible en un gran volumen con exactamente la misma energía de pulso y dosis de láser. No hay dependencia de la posición a la fabricación. Esto es importante para la aplicación industrial.

60 Otras demostraciones han consistido en grafitos puntiformes en una matriz. En otras aplicaciones, se han generado estructuras gráficas continuas que pueden utilizarse como conductores eléctricos.

65 El seguimiento del diamante a través del foco láser (o el barrido del láser en relación con una muestra de diamante fija) permite la creación de pistas continuas de material modificado por láser. Trabajando en régimen de fabricación (ii), estas pistas contienen carbono enlazado sp² y son conductoras de la electricidad. Pueden utilizarse para formar cables conductores que recorren el diamante en 3 dimensiones. Por ejemplo, la figura 1 muestra varias pistas gráficas continuas 110 que siguen trayectorias 2D y 3D bajo la superficie 120 de una muestra de diamante. La figura 1A

muestra una vista superior de la pista graffítica 110. Las figuras 1B y 1C muestran vistas laterales de la pista graffítica 110, y la figura 1D muestra una vista en perspectiva de la pista graffítica escrita 0. La escala 125 muestra 5 μm . La elipse discontinua de la figura 1C muestra una porción de la pista graffítica que se fabrica con profundidad creciente.

5 Dichas pistas graffíticas 110 pueden servir como cables conductores y son útiles en la fabricación de sensores basados en diamante para la detección de radiaciones o sustancias químicas. En una realización, los cables que atraviesan el diamante pueden tener un voltaje aplicado a través de ellos para establecer un campo eléctrico local dentro del diamante. Si la radiación ionizante incide sobre el diamante, puede crear carga libre al atravesar el diamante, que es recogida por los electrodos; en otra realización, los cables incrustados pueden utilizarse para electroquímica, aprovechando la amplia ventana de potencial del diamante. Los cables incrustados pueden utilizarse para crear un campo eléctrico cerca de la superficie del diamante, que luego se sumerge en una solución. Estos cables incrustados escritos con láser pueden conectarse a componentes electrónicos externos acercándolos a la superficie de diamante, que posteriormente se recubre de metal para lograr una conexión eléctrica eficaz.

15 Corrección de aberraciones

En el caso ideal, el tamaño del foco láser debe estar en el límite de difracción, es decir, el tamaño de punto más pequeño posible para una longitud de onda, un índice de refracción y una apertura numérica de la lente objetivo determinados. Sin embargo, a menudo este límite no se alcanza debido a los efectos de las aberraciones. Las aberraciones son desviaciones del sistema óptico respecto a su rendimiento ideal de enfoque; en términos de óptica de rayos, las aberraciones hacen que los rayos del cono de enfoque ya no se encuentren en el mismo punto. Desde el punto de vista de la óptica ondulatoria, los frentes de onda que convergen en el foco ya no adoptan la forma del casquete esférico necesario para enfocar un punto limitado por difracción. En este caso de óptica ondulatoria, las aberraciones suelen cuantificarse en términos del error de fase óptica entre el frente de onda ideal y el distorsionado, y los distintos tipos de distorsiones se caracterizan por errores de fase diferentes. Los efectos de las aberraciones en el enfoque consisten en dispersar o difuminar el enfoque al tiempo que reducen su intensidad máxima. Por la naturaleza del enfoque, la dispersión se produce predominantemente a lo largo del eje óptico.

La figura 2A muestra un ejemplo de un tipo de modo de aberración particular: la aberración esférica, en la fabricación por láser, las aberraciones se producen con frecuencia debido a la refracción de los rayos en la superficie del material transparente dentro del cual se pretende fabricar. Esto podría ocurrir en la interfaz entre, por ejemplo, el medio de inmersión de la lente objetivo (normalmente aire, aceite u otros medios) y el material de fabricación. Los rayos de luz 210 que entran en la muestra 220 son refractados por la superficie de la muestra 222 y el foco resultante 230 se distorsiona y se alarga. El frente de onda plano 240 significa que los rayos paralelos 210 entran en la lente de alta NA 250, lo que daría lugar a un enfoque ideal si la muestra 220 estuviera ausente.

La figura 2B muestra el caso en que el frente de onda 240 ya ha sido corregido por un elemento óptico activo, como un SLM, que ha modificado su fase para contrarrestar la refracción de la superficie 222 de la muestra. En consecuencia, en ausencia de una muestra 220, los rayos 210 que salen de la lente no darían lugar a un enfoque ideal. Sin embargo, dada la presencia de la muestra, los rayos 210 se refractan en la superficie 222 y dan lugar a un enfoque mejorado 232. Por lo tanto, al modelar el frente de onda incidente mediante óptica adaptativa, se cancela la aberración, lo que permite un enfoque preciso y una fabricación fiable de características submicrométricas.

La figura 3A muestra las características fabricadas 310 (izquierda) creadas enfocando en el interior del diamante a una profundidad de 50 μm utilizando corrección de aberración de óptica adaptativa. Las características 320 (derecha) son la misma estructura, pero realizada sin corrección de aberraciones. La energía de los pulsos láser tuvo que aumentar considerablemente para que se produjera algún tipo de fabricación. El láser de fabricación incidía a lo largo del eje z. Se verá que la fabricación de las características 310 está mucho mejor controlada que la de las características 320. La figura 3B muestra las mismas características desde el lateral. Se apreciará que las características creadas utilizando la técnica de corrección de aberraciones de la presente invención están significativamente mejor controladas en la dirección de propagación (es decir, la dirección z).

Si la interfaz de la muestra es normal al eje óptico, la aberración consiste en un efecto de reenfoque (un desplazamiento focal a lo largo del eje óptico) además de la aberración esférica. La amplitud de estos efectos es proporcional a la profundidad de enfoque. Una expresión para la aberración esférica de este tipo es:

$$\varphi_{SA}(\rho) \approx \frac{-2\pi d_{\text{nom}}}{\lambda} \left(\sqrt{n_2^2 - (NA\rho)^2} - \sqrt{n_1^2 - (NA\rho)^2} \right)$$

Esta ecuación es una descripción analítica de la fase de aberración esférica φ_{SA} para la luz de longitud de onda λ cuando se enfoca a una profundidad d_{nom} dentro de un material de índice de refracción n_2 , utilizando una lente objetivo con apertura numérica NA y medio de inmersión n_1 . La coordenada ρ es el radio normalizado en la pupila de la lente objetivo.

si la normal de la superficie está inclinada con respecto al eje óptico, se introducen otras aberraciones como el coma

(que incluye la inclinación del frente de onda, lo que provoca un desplazamiento focal lateral). Estos efectos son proporcionales tanto a la profundidad de enfoque como al ángulo de inclinación de la superficie. La aberración adicional debida a una pequeña inclinación de la superficie viene dada por:

$$\varphi_{\text{inclinación}}(\rho, \theta) = \frac{t \cdot d_{\text{nom}}}{\lambda} (a\rho + b\rho^3) \cos(\theta - \xi)$$

Esta ecuación es una descripción analítica del componente de aberración debido a la inclinación de la superficie, donde la inclinación es en un ángulo pequeño t . θ es la coordenada azimutal en la pupila y ξ representa la orientación de la inclinación. Los factores a y b son coeficientes escalares cuyos valores dependen de los índices de refracción y NA.

La combinación de aberración esférica y coma provoca reducciones de la intensidad focal y distorsiones de la distribución de la intensidad que afectan a la eficacia y precisión de la fabricación.

Los efectos de la refracción en la superficie del diamante son fuertes, debido al elevado índice de refracción del diamante (índice de refracción de 2,4, frente al 1,0 del aire y al 1,5 aproximadamente del aceite de inmersión). Esto significa que la corrección de la aberración permitirá la producción de características finas a profundidades que de otro modo no serían posibles. La corrección de las aberraciones se implementa fácilmente utilizando un modulador espacial de luz (SLM) de cristal líquido, pero también puede implementarse utilizando un espejo deformable.

Aunque son posibles los métodos de corrección estática, diversos ensayos indican que las correcciones estáticas no son eficaces para corregir las aberraciones entre muestras nominalmente similares debido a ligeros cambios en la composición y la posición del material, y que en su lugar es necesaria una corrección adaptativa de las aberraciones bien ajustada. Por lo tanto, un enfoque único no puede alcanzar el mismo grado de control que el método actual.

Las exigencias de corrección de la aberración aumentan si se utiliza una lente objetiva seca para enfocar en profundidad en el diamante. Los requisitos de corrección de la aberración son menos severos utilizando una lente de inmersión en aceite para enfocar el láser, ya que el contraste del índice de refracción es menor que con una lente seca. Sin embargo, en este caso sigue siendo necesaria una corrección para obtener resultados viables.

Un patrón de fase calculado a partir de las ecuaciones anteriores puede impartirse al dispositivo de corrección de la aberración (es decir, el elemento óptico activo), tal como un modulador espacial de luz (SLM), con el fin de corregir la aberración inducida por la muestra. Como los SLM suelen tener un rango de modulación de fase limitado a una longitud de onda (o a un pequeño número de longitudes de onda), la fase suele envolverse de forma que quede dentro del rango accesible. Por ejemplo, si sólo se puede acceder a una única longitud de onda, la función de fase aplicada será módulo $\varphi_{SA} 2\pi$, ya que 2π radianes de fase corresponden a una longitud de onda.

El patrón de fase aplicado al SLM puede simplificarse observando que el término de aberración esférica contiene desenfoque, que es otro modo o componente de aberración que desplaza el foco (es decir, la intensidad óptica máxima) a lo largo del eje óptico, pero no cambia su forma. Al eliminar el componente de desenfoque de la corrección, se puede reducir el tamaño de la corrección de fase, con lo que se aprovecha mejor el SL para la corrección de aberraciones. El componente de desenfoque de la aberración esférica puede compensarse mediante la traslación de la muestra en una cantidad adecuada. Del mismo modo, la aberración de coma para una muestra inclinada incluye una aberración de "inclinación", un gradiente de fase constante que provoca un desplazamiento lateral del foco. Una vez más, esta inclinación puede eliminarse del patrón de fase antes de impartirlo en el SLM. El desplazamiento lateral puede compensarse mediante la traslación de la muestra.

En lugar de utilizar directamente las expresiones analíticas, las aberraciones pueden considerarse como una serie de funciones de base. Para ello se suelen utilizar los polinomios de Zernike. Por lo tanto, una aberración puede describirse como una suma de modos de aberración. Por ejemplo, la aberración esférica puede expresarse como una expansión en términos de polinomios de Zernike. El uso de funciones como éstas ayuda en el diseño de sistemas de retroalimentación para la medición y corrección de aberraciones desconocidas.

Los métodos descritos en el presente documento son también pertinentes para el enfoque a través de superficies no planas. Esto puede incluir superficies curvas o bordes cercanos o transversales. Una vez más, una medición previa precisa de la topografía de la superficie puede utilizarse para predecir un patrón de fase inicial que se aproxime al óptimo y pueda utilizarse como un buen punto de partida para la optimización posterior mediante retroalimentación focal. La fabricación a través o cerca de un borde implica la segmentación de la pupila. Los métodos descritos en el presente documento pueden adoptarse para ajustar la fase de corrección de las aberraciones esférica y de coma en la pupila segmentada. Enfocar a través de una superficie curva requerirá la corrección de una combinación de aberración esférica, astigmatismo y coma.

Control adaptativo del enfoque

Para mantener una calidad de fabricación constante entre diferentes posiciones (en particular, profundidades) dentro de una muestra y entre diferentes muestras, es necesario aplicar un sistema de control adaptativo que pueda mantener una combinación adecuada de corrección de la aberración y energía de pulso. Para ello se puede utilizar un método de retroalimentación desde la región focal a los dispositivos que controlan el frente de onda y la energía.

Una primera medición de la posición y la inclinación de la superficie basada en la reflexión de la superficie del material, como se ha descrito anteriormente, proporciona una predicción de la corrección necesaria para contrarrestar la aberración esférica y el coma. En una realización, una medición de la posición para el mejor enfoque óptico en tres puntos que no están todos en el mismo eje puede proporcionar información sobre la inclinación relativa de la muestra. Esto puede permitir la corrección predictiva de la aberración para el coma y la aberración esférica a una profundidad particular en una muestra, por ejemplo, diamante.

Se puede realizar una compensación más fina observando con un microscopio el proceso de fabricación en el foco. Es posible una combinación de medidas. Utilizando un microscopio de transmisión es posible observar cambios en la absorción en el foco o un cambio en la fase óptica debido a la modificación del índice de refracción. Esto indica el grado en que el material es modificado por el pulso láser y puede proporcionar una señal de retroalimentación para la optimización de la corrección de la aberración y la energía del pulso. Las señales de retroalimentación alternativas podrían provenir de la fotoluminiscencia o de la emisión de plasma del foco.

Para reducir el número de mediciones necesarias (y, por lo tanto, el tiempo empleado) en el proceso de optimización, pueden utilizarse algoritmos en los que los coeficientes de los modos de aberración (en particular, la aberración esférica y el coma) y la energía del pulso se consideran coordenadas desconocidas en un espacio de búsqueda.

El proceso de optimización puede expresarse matemáticamente como la minimización de una función de coste f (o alternativamente, g puede ser una función de mérito que debe maximizarse) que está relacionada con los componentes de aberración y la energía del pulso, representados colectivamente por el símbolo P . El valor óptimo de P viene dado por

$$P_{opt} = \arg \min_P [f(P)]$$

donde la función de coste debe minimizarse o

$$P_{opt} = \arg \max_P [g(P)]$$

donde debe maximizarse la función de mérito. La función f o g puede definirse como una combinación de medidas. Por ejemplo, la intensificación del plasma focal generado durante la fabricación láser depende del contenido de aberración total, de modo que un sistema corregido muestra un máximo en la emisión de plasma focal. Alternativamente, el láser de fabricación puede utilizarse por debajo del umbral de modificación estructural para excitar de forma no lineal la fotoluminiscencia (PL) de los defectos intrínsecos contenidos en la muestra. El PL detectado es máximo cuando las aberraciones son mínimas. Del mismo modo, la emisión de luminiscencia o fluorescencia en un microscopio confocal se maximiza cuando se corrigen las aberraciones. Por lo tanto, estas señales pueden utilizarse como mecanismo de retroalimentación para permitir la optimización de la función coste/mérito.

Existen varios métodos para llevar a cabo procesos de optimización. El número mínimo de parámetros desconocidos que deben optimizarse para la fabricación láser a través de una superficie plana inclinada, cuando se conocen los índices de refracción y la NA, es de tres: un coeficiente de aberración esférica y dos para el coma (es decir, los dos componentes ortogonales del coma). Por tanto, el proceso puede considerarse un problema de optimización tridimensional. Se puede considerar otra variable en forma de energía de pulso, lo que amplía el proceso a una optimización cuatridimensional. Si hubiera más incógnitas, habría que considerar más variables (dimensiones) en el proceso de optimización.

La optimización adaptativa podría realizarse punto por punto para cada posición fabricada, aunque probablemente sea más práctico realizar menos mediciones de optimización en todo el campo de fabricación y realizar la interpolación de los parámetros en este campo. Este campo puede existir en una línea o curva, un plano lateral o extenderse a través de tres dimensiones. Con suficientes mediciones de superficie, se puede conseguir un enfoque adecuadamente corregido (es decir, con una relación de Strehl suficientemente grande). No obstante, puede realizarse un procedimiento de optimización para cada nueva muestra.

Descripción de las marcas a gran escala

También son posibles estructuras y marcas a mayor escala. Puede incluir características puntuales o líneas continuas para crear caracteres alfanuméricos, códigos de barras, códigos QR o imágenes. Estas características podrían

agruparse para formar elementos difractivos, hologramas o rejillas de difracción. Los rangos de profundidad y las áreas pueden ser de hasta el tamaño de la piedra que se utiliza (normalmente en el rango de 3 mm en las direcciones transversales x e y , y 1 mm en la dirección de propagación z). El tamaño de las características puede ser de hasta 5 μm de ancho (en las direcciones x e y) por $20\mu\text{m}$ en la dirección de propagación z . En la práctica, si las características más grandes deben ser creados de forma fiable, se puede lograr mediante la costura de combinaciones de modificaciones de menor escala. Al generar características de gran tamaño, hay que tener cuidado de controlar la carga de tensión en la muestra circundante (por ejemplo, el diamante) para evitar que se formen grietas irregulares a gran escala. Esto podría lograrse mediante un conjunto disperso de características pequeñas (escala $\sim 1\ \mu\text{m}$) que están vinculadas entre sí para formar una característica que parece grande cuando se ve ópticamente, pero sólo tiene una mínima conversión de volumen de diamante a grafito.

Diagrama esquemático de una aplicación típica

La figura 4 muestra una configuración ejemplar del sistema de fabricación adaptable. Pueden añadirse componentes adicionales para, por ejemplo, ayudar a detectar la aberración o la posición, realizar una corrección adicional de la aberración o paralelizar el sistema y utilizar múltiples puntos focales.

El sistema láser 400 incluye un láser 410, un polarizador 420, un modulador espacial de luz (SLM) 430, una lente objetivo de alta NA 440, y una platina de traslación tridimensional 450. Una muestra 460 se coloca en la platina 450 en el foco del sistema 400.

La muestra 460 es de diamante y se coloca en el sistema láser 400 para ser modificada por el láser 410. A continuación, se mide la muestra 480 para determinar una corrección. En particular, se mide la superficie de la muestra 460 sobre la que incidirá el láser y se determina su inclinación con respecto a la transversal. La dirección transversal es el plano 2D perpendicular a la dirección de propagación primaria del láser. También es el plano paralelo al plano mayor de la lente objetivo.

La inclinación de la superficie de la muestra 460 se utiliza para determinar la aberración de coma esperada que se producirá por ello en el foco láser. La aberración esperada se caracteriza entonces en términos de un modo de Zernike, y se comunica al SLM. El SLM se modifica para mostrar la corrección de fase necesaria a fin de modificar el láser para contrarrestar la aberración.

La energía de pulso del sistema láser también se determina en función de la corrección. El láser se ajusta a la energía de pulso necesaria y, a continuación, se utiliza para modificar la muestra de diamante.

Tras la modificación, la región modificada de la muestra se mide mediante microscopía de transmisión. A continuación, la corrección determinada se afina en función de la información obtenida por esta medición adicional. La corrección refinada se aplica al SLM y la muestra se modifica con láser.

Ejemplo

El diamante se monta en el sistema de fabricación por láser. La lente del objetivo se mueve axialmente (*es decir*, en la dirección z) para encontrar inicialmente la superficie del diamante maximizando la luz reflejada de un LED. El diamante se desplaza en las direcciones transversales (x - y) hasta la ubicación deseada para la fabricación.

El posicionamiento fino para la localización axial (z) de la superficie se consigue utilizando el láser con baja energía de pulso (significativamente por debajo del umbral de grafitización del bulto, *por ejemplo*, menos de 30 nJ). La superficie de la muestra se encuentra desplazando el diamante axialmente en pasos de 100 nm; si se utiliza una lente de inmersión en aceite, el diamante se desplaza hasta el punto en el que el láser ya no hierve el aceite de inmersión; si se utiliza una lente de aire, el diamante se desplaza hasta que el láser ya no provoca ninguna marca en la superficie del diamante. Se realizan otras dos mediciones de este tipo, una mediante una traslación de 0,2 mm en la dirección x y otra mediante una traslación de 0,2 mm en la dirección y . Estas mediciones cubren un área de la muestra y se utilizan para determinar la inclinación local de la superficie.

A continuación, el diamante se traslada axialmente a la profundidad deseada para su fabricación, teniendo en cuenta que la profundidad de fabricación real es mayor que la profundidad de traslación en un factor de aproximadamente 2 para lentes de aceite de alta AN y de aproximadamente 2,7 para una lente de aire de alta AN. Esto se debe a que el SLM se utiliza para corregir todas las aberraciones causadas por la refracción en la interfaz de la muestra, excepto el desenfoque, que se contrarresta de forma más sencilla mediante la traslación axial del diamante, como se ha descrito anteriormente.

La corrección de la aberración se aplica al SLM basándose en las mediciones de la superficie. La corrección representa una corrección de la aberración esférica basada en la profundidad axial trasladada, y una aberración de coma en las direcciones x e y basada en la inclinación de la superficie x e y medida. Se utiliza una energía de pulso predeterminada (por ejemplo, 100 nJ para una lente de aceite de 1,4 NA utilizando luz de longitud de onda de 780 nm con una duración de pulso de 250 fs) y se dispara una ráfaga de 5 pulsos en el diamante. Se utiliza un microscopio de transmisión para

verificar que se ha modificado con éxito el diamante en el punto deseado. La fabricación preferida debe tener unas dimensiones de aproximadamente 0,5 μm (en la dirección transversal) por aproximadamente 1 μm (en la dirección axial) y aparecerá oscura cuando se observe en un microscopio de transmisión.

5 También hay que compensar las aberraciones en la imagen para poder ver la fabricación. A continuación, se comprueba que el diamante puede seguir modificándose con una energía de pulso y/o una dosis menores hasta el punto de que la modificación se vuelve invisible. A continuación, el patrón deseado se fabrica dentro del diamante como se desea. Cuando hay una inclinación de la muestra, los movimientos transversales del diamante van acompañados de movimientos axiales para garantizar que los puntos fabricados permanezcan a una profundidad constante bajo la superficie del diamante. Si se requiere un diseño fabricado en 3D, el patrón de fase mostrado en el SLM se actualiza automáticamente durante la fabricación en función de la información recibida de las etapas de traslación.

15 si no se aprecia ninguna modificación al irradiar el diamante con la primera ráfaga de pulsos, se traslada la muestra una pequeña distancia en dirección transversal (por ejemplo, 5 ppm) y se ajustan de forma sistemática los modos de aberración aplicados al SLM con una ráfaga del láser aplicada para cada ajuste. El diamante se desplaza axialmente entre cada ráfaga y se comprueba si se modifica como se desea. Una vez que la fase correcta se muestra en la SLM, la fabricación se lleva a cabo directamente como se ha descrito anteriormente sin necesidad de corrección adaptativa adicional.

20 Para optimizar la fase de SLM podrían utilizarse otras métricas distintas de la modificación visible del diamante, por ejemplo, la fotoluminiscencia no lineal del diamante causada por el enfoque del láser podría optimizarse para corregir las aberraciones. Para esta medición, la energía de pulso del láser se reduce para garantizar que no haya fabricación (energía de pulso por debajo de, por ejemplo, 20 nJ utilizando las condiciones descritas anteriormente) o, idealmente, cambiando a un láser con una tasa de repetición más alta y una energía de pulso baja (tasa de repetición de 80 MHz y energía de pulso < 20 nJ). Se pueden medir las características del foco y determinar las aberraciones que lo afectan. A continuación, se puede determinar una corrección y aplicarla al elemento óptico activo para mejorar la relación de Strehl del foco. La necesidad de tal procedimiento de corrección adaptativa puede ser escasa dadas las mediciones precisas de la superficie.

30 El método anterior puede utilizar un láser de fabricación infrarrojo de femtosegundo para modificar la fibra, pero las técnicas también pueden aplicarse a sistemas de fabricación de cualquier longitud de onda o cualquier anchura de pulso. Por ejemplo, pueden utilizarse sistemas ultravioleta (UV) y de onda continua (CW). Normalmente, el láser de fabricación induce un aumento del índice de refracción de la muestra. Sin embargo, en algunos materiales el láser puede inducir una disminución del índice de refracción. Los dispositivos ópticos fabricados pueden funcionar con una longitud de onda diferente a la del láser de escritura. Los dispositivos pueden fabricarse para cualquier longitud de onda de funcionamiento del dispositivo óptico.

REIVINDICACIONES

1. Un método para la modificación por láser de una muestra (460) que comprende diamante o piedra preciosa para formar una región modificada (110, 310) en una ubicación objetivo dentro de la muestra (460), que comprende:
- 5 posicionar una muestra (460) que comprende diamante o piedra preciosa en un sistema láser (400) para su modificación por un láser (410); y caracterizado por medir la inclinación de una superficie de la muestra (460) a través de la cual se enfoca el láser; utilizar al menos la inclinación medida para determinar una corrección que debe aplicarse a un elemento óptico activo (430) del sistema láser (410);
- 10 aplicar la corrección al elemento óptico activo (430) para modificar las propiedades de frente de onda del láser con el fin de contrarrestar un efecto de coma en el enfoque del láser; y modificar con láser la muestra (460) en la ubicación objetivo utilizando el láser con las propiedades de frente de onda corregidas para producir la región modificada (110, 310).
- 15 2. Un método de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende la medición de la posición de la muestra (460) dentro del sistema láser (400); utilizando también la posición medida para determinar una profundidad de fabricación y la corrección que debe aplicarse al elemento óptico activo (430) del sistema láser (400).
- 20 3. Un método de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, que comprende aplicar la corrección al elemento óptico activo (430) para modificar las propiedades de frente de onda del láser para contrarrestar un efecto de aberración esférica en el enfoque del láser.
- 25 4. Un método de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, que comprende medir la muestra (460) después de formar la región modificada (110, 310), y modificar la corrección aplicada al elemento óptico activo basándose en la medición adicional.
- 30 5. Un método de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en el que el enfoque láser tiene una relación de Strehl superior a 0,5.
- 35 6. Un método de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, que comprende medir un enfoque del láser dentro de la muestra (460), y modificar la corrección aplicada al elemento óptico activo (430) basándose en el enfoque medido.
- 40 7. Un método de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en el que la determinación de una corrección se basa al menos en parte en una energía de pulso del láser (410); comprendiendo el método preferentemente el uso de un láser pulsado (410) con energías de pulso de entre 10 nJ y 300 nJ.
- 45 8. Un método de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, que comprende la modificación por láser de la muestra (460) utilizando un único pulso láser; y/o que comprende la modificación por láser de la muestra (460) mediante una pluralidad de rayos láser.
- 50 9. Un método de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en el que la formación de una región modificada (110, 310) incluye el uso de interacciones ópticas no lineales para provocar la modificación del material.
- 55 10. Un método de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en el que la formación de una región modificada (110, 310) comprende modificar sólo el material dentro de la masa de la muestra (460).
- 60 11. Un método de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en el que la determinación de una corrección comprende el cálculo de los coeficientes de una expansión de Zernike.
- 65 12. Un método de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, que comprende la modificación de una región de menos de 1 micrómetro en la dirección de propagación.
- 70 13. Un sistema que incluye una muestra y un sistema láser de femtosegundo o picosegundo dispuesto para realizar el método de cualquier reivindicación anterior para formar la región modificada (110, 310) a una profundidad objetivo dentro de la muestra (460) que comprende diamante o piedra preciosa, que comprende:
- 75 un láser (410);
la muestra (460) que comprende diamante o piedra preciosa;
un dispositivo de medición dispuesto para medir la inclinación de la muestra (460); y
un procesador y un elemento óptico activo, en el que el procesador está configurado para determinar la corrección que debe aplicarse al elemento óptico activo utilizando la inclinación medida, y para comunicar la corrección al elemento óptico activo.
- 80 14. Un método para la modificación por láser de una piedra preciosa (460) para formar una región modificada (110, 310) en una ubicación objetivo dentro de la piedra preciosa (460), que comprende:
- 85 posicionar una piedra preciosa (460) en un sistema láser (400) para su modificación por un láser (410); y caracterizado

ES 3 013 117 T3

por

medir un foco del láser dentro de la piedra preciosa (460);

utilizar al menos la medición del enfoque para determinar una corrección que debe aplicarse a un elemento óptico activo (430) del sistema láser (400);

- 5 aplicar la corrección al elemento óptico activo (430) para modificar las propiedades de frente de onda del láser para contrarrestar un efecto de aberración en el enfoque del láser; y
- modificar con láser la piedra preciosa (460) en la ubicación objetivo utilizando el láser con las propiedades de frente de onda corregidas para producir la región modificada (110, 310).
- 10 15. Un método de acuerdo con la reivindicación 14, en el que la aplicación de la corrección al elemento óptico activo (430) da como resultado un enfoque láser con una relación de Strehl superior a 0,5; y/o en el que la corrección contrarresta un efecto de aberración de coma en el enfoque del láser; y/o en el que la corrección contrarresta el efecto de la aberración esférica en el enfoque del láser.

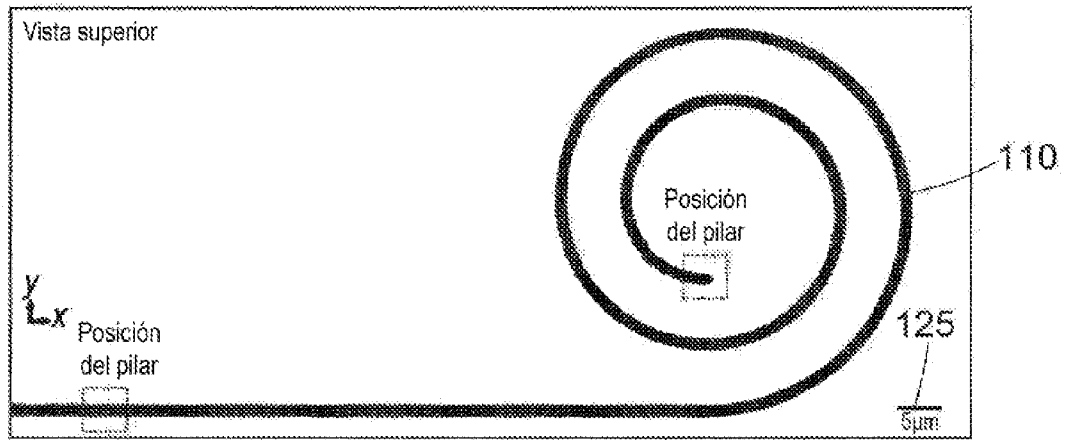


Fig. 1A

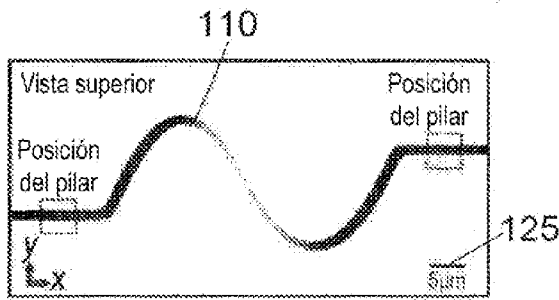


Fig. 1B

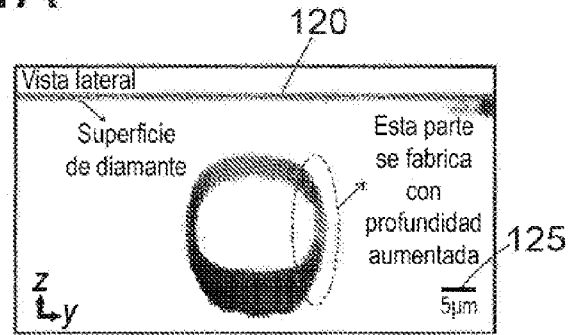


Fig. 1C

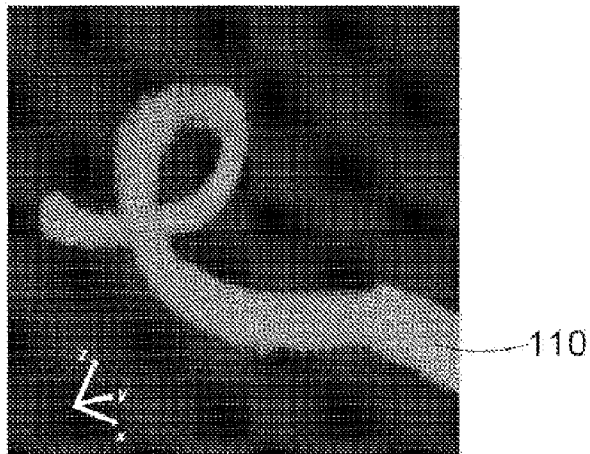


Fig. 1D

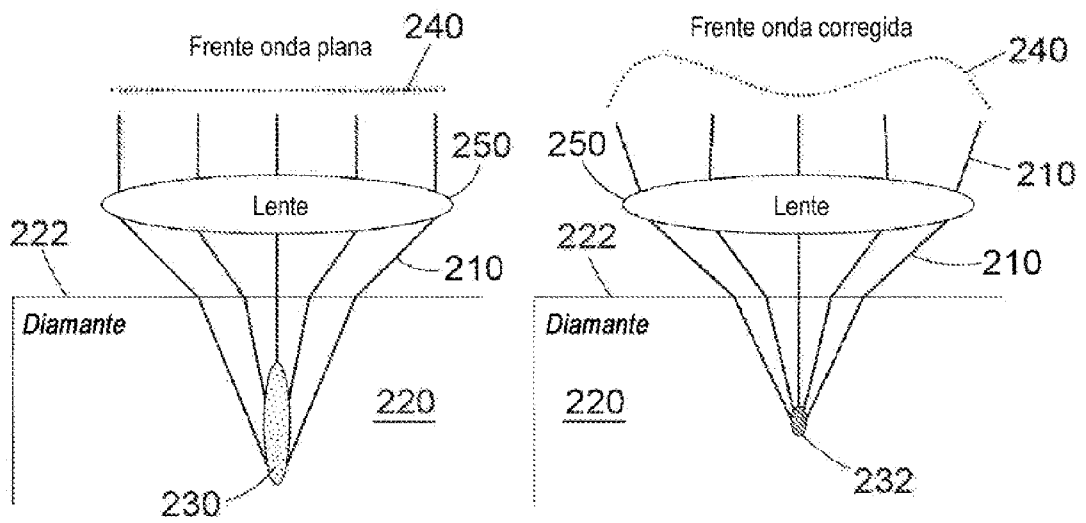


Fig. 2A

Fig. 2B

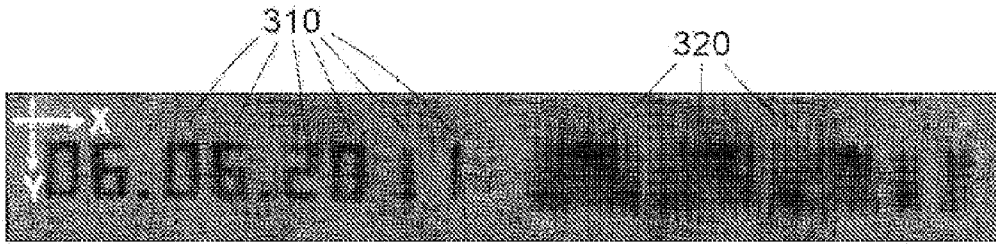


Fig. 3A

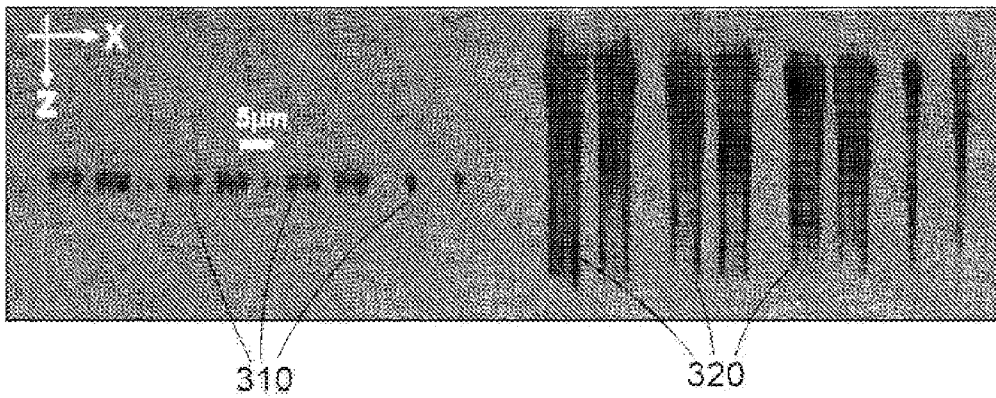


Fig. 3B

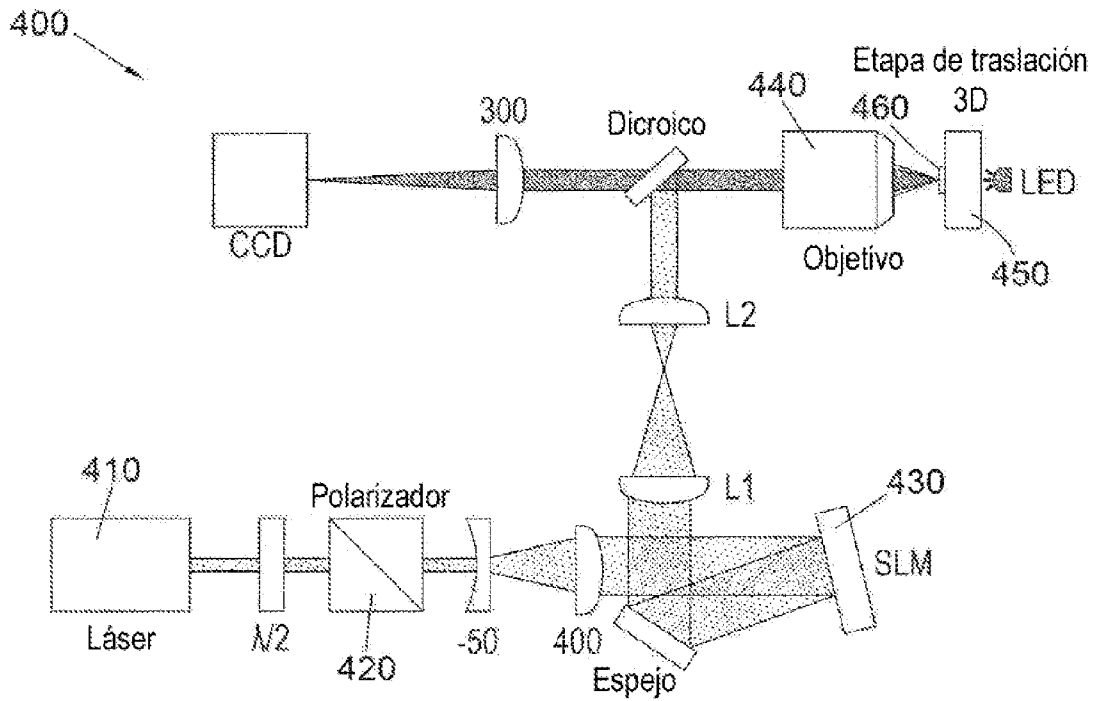


Fig. 4