

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 959 574**

51 Int. Cl.:

B23K 26/00 (2014.01)
B23K 26/08 (2014.01)
B23K 26/36 (2014.01)
B23K 26/40 (2014.01)
B23K 26/082 (2014.01)
B23K 26/352 (2014.01)
B23K 26/0622 (2014.01)
B29D 11/00 (2006.01)
B23K 103/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **20.12.2018** **E 18214474 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **18.10.2023** **EP 3511106**

54 Título: **Mejoras en o relacionadas con mecanizado basado en láser**

30 Prioridad:

22.12.2017 GB 201721709

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
27.02.2024

73 Titular/es:

POWERPHOTONIC LTD (100.0%)
5A St. David's Drive, St. David's Business Park,
Dalgety Bay
Fife KY11 9PF, GB

72 Inventor/es:

BLAIR, PAUL;
COURTNEY, CHRIS;
PARSONAGE, TINA;
LOPES, AMIEL;
WLODARCZYK, KRYSYAN y
HAND, DUNCAN

74 Agente/Representante:

SÁEZ MAESO, Ana

ES 2 959 574 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

Mejoras en o relacionadas con mecanizado basado en láser

5 La presente invención se relaciona con mecanizado basado en láser y en particular con un proceso de mecanizado basado en láser de escritura directa que usa una técnica de barrido de disposición entrelazada para proporcionar mecanizado de alta calidad y alta eficiencia de materiales tales como sílice fundida para la fabricación de elementos ópticos.

10 Se requieren ópticas esféricas, de forma libre y hechas a medida, de alta calidad para un amplio rango de aplicaciones. Un ejemplo es la óptica de corrección para láseres de diodo de alta potencia para mejorar brillo. En este caso, aunque se pueden usar componentes estándar disponibles para la venta, dado que las características de láser difieren desde un dispositivo al otro, la corrección proporcionada solo puede ser parcial. La solución óptima involucra medir los errores de salida y producir ópticas de corrección hechas a medida. Más en general, las ópticas esféricas son altamente deseadas por su capacidad de proporcionar una solución compacta de único componente para la generación de imágenes de alta calidad requerida en muchos dispositivos comerciales y científicos. Los métodos tradicionales tales como rectificado están limitados en términos de las conformaciones que se pueden lograr, mientras que el moldeo de precisión se restringe a los vidrios o polímeros con puntos de fusión más bajos. Ahora se han desarrollado procesos de mecanizado de escritura directa por láser. La escritura directa es la técnica de mecanizar, marcar o texturizar un material en donde el sustrato se coloca en el plano focal de un haz láser enfocado y el haz se traslada sobre el sustrato ya sea moviendo el haz o el sustrato con respecto al haz.

20 El documento US8570657 del presente Solicitante divulga un elemento microóptico para uso con un apilamiento de barras de diodos láser emisores de borde, comprendiendo el elemento una pluralidad de colimadores de eje rápido espaciados formados como un arreglo monolítico, en donde la pluralidad de colimadores de eje rápido tiene cada uno características determinadas por las ubicaciones de emisores en el apilamiento de barras de diodos láser medido y el espaciado entre los colimadores en el eje rápido varía a través del elemento microóptico. También se describe un método de fabricación de un elemento microóptico para uso con un apilamiento de barras de diodos láser, usando un láser de CO₂ estabilizado en longitud de onda. El láser, un modulador acústico-óptico y una etapa de traslación se controlan para extirpar porciones de un sustrato monolítico en un régimen de disposición de disparo a disparo para formar un arreglo de formas de lentes predeterminadas sobre el sustrato.

30 El documento WO2012119761 de Fraunhofer Ges Zur Foerderung Der Angewandten Forschung EV se relaciona con un método para producir elementos ópticos, en el cual la superficie de una pieza en bruto se trabaja por medio de radiación de alta energía para aproximarse a un contorno de superficie deseado, inicialmente mediante retiro grueso de material. Después del retiro grueso, la superficie trabajada se pule con radiación de alta energía, se miden ópticamente el contorno de superficie y rugosidad de superficie y se comparan con un contorno de superficie deseado y una rugosidad de superficie deseada. Si el contorno de superficie medido o rugosidad de superficie se desvían desde el contorno de superficie deseado y rugosidad de superficie deseada fuera de límites de tolerancia predeterminados, se realiza un retiro de material extremadamente fino por medio de radiación de alta energía hasta que la desviación yazca dentro de los límites de tolerancia predeterminados. El método es particularmente adecuado para la producción flexible de elementos ópticos con diámetros superiores a 1 mm y superficies esféricas o de forma libre.

40 Se han usado todas las técnicas de escritura directa basadas en láser que usan CO₂, excímero y pulsos de láser ultracortos para mecanizar sustratos de vidrio de sílice fundida. Los pulsos de láser ultracortos dependen de una absorción no lineal, mientras que los láseres excímeros y de CO₂ pueden procesarse en un régimen lineal.

45 Heidrich, S., Richmann, A., Schmitz, P., Willenborg, E., Wissenbach, K., Loosen, P., Poprawe, R.: Optics manufacturing by laser radiation. Opt. Lasers Eng. 59, 34-40 (2014) describe un proceso con láser de CO₂ de tres etapas que consiste en (i) una etapa de ablación con láser de CO₂ de 1.2 kW de alta velocidad que proporciona retiro de material a una tasa de 20 mm³/s, seguido de (ii) un proceso de pulido con láser de CO₂ de 1.5 kW desenfocado el punto para que tenga un diámetro de $d_s = 650 \mu\text{m}$ después del cual (iii) se lleva a cabo un proceso de corrección de forma para retirar la ondulación usando un láser ultrarrápido o uno de CO₂ al cual sigue otra etapa de pulido para retirar la rugosidad generada por el proceso de corrección de forma. Las altas tasas de ablación son posibles debido a la alta potencia promedio junto con un diámetro de punto láser de 450 μm y una velocidad de barrido que oscila desde 1 a 10 ms⁻¹. Sin embargo, como un proceso accionado térmicamente, esto se limita a la sílice fundida a menos que se use una disposición de calentamiento adicional - por ejemplo para mecanizar BK7.

50 Chiu, C.C., Lee, Y.C.: Fabricating of aspheric micro-lens array by excimer laser micromachining. Opt. Lasers Eng. 49, 1232-1237 (2011) describe láseres de excímero que operan en UV a 248 nm para micromecanizar vidrio que produce características muy finas. Sin embargo, debido a la baja calidad de haz en este caso es necesario usar un proceso de generación de imagen de máscara, y por tanto no es adecuado para ópticas hechas a medida, ya que esto requeriría máscaras hechas a medida.

55 Liu, X., Du, D., Mourou, G.: Laser ablation and micromachining with ultrashort laser pulses. IEEE.J Quantum Electron. 33, 1706-1716 (1997) usa la alta potencia pico de pulsos ultracortos, lo cual permite la absorción de múltiples fotones, y por tanto el mecanizado de materiales que normalmente son transparentes en la longitud de onda de láser. La corta

longitud de pulso significa que es posible retirar material con un calentamiento mínimo del material circundante - a menudo se describe como mecanizado 'en frío'. Por tanto esto se puede usar en una variedad de vidrios donde la expansión térmica normalmente sería un problema.

5 Heidrich, S., Willenborg, E., Richmann, A.: Development of a Laser Based Process Chain for Manufacturing Freeform Optics. Phys. Procedia. 12, 519-528 (2011) también describe un proceso de mecanizado láser ultrarrápido que usa un láser de 500 fs con una potencia promedio de 160 W que proporciona tasas de ablación de $1.5 \text{ mm}^3\text{s}^{-1}$ usando velocidades de barrido de 4 a 8 ms^{-1} . Sin embargo este proceso proporciona una superficie con una rugosidad relativamente alta (R_a en el rango 0.9 - $1.5 \mu\text{m}$) que es difícil de pulir para obtener una suavidad aceptable.

10 Los documentos US 2016/129526, US 2012/140334, US 2016/243646, JP 3 704096, DE 10 2011 103793 y CN 103203541 todos divulgan procesos que usan un barrido de disposición que son útiles para entender la invención.

Un objeto de la presente invención es proporcionar un proceso de mecanizado basado en láser para materiales de vidrio que alivie o mitigue al menos algunas de las desventajas de la técnica anterior.

De acuerdo con la presente invención se proporciona un proceso de mecanizado basado en láser de escritura directa de acuerdo con la reivindicación 1.

15 Entrelazando las líneas de barrido se pueden superar los efectos negativos asociados con la acumulación térmica. Esto puede permitir una velocidad de proceso aumentada. También se ha encontrado una ventaja inesperada en la profundidad de mecanizado aumentada y calidad de superficie mejorada en bajas tasas de repetición.

20 Preferiblemente, el patrón de barrido de disposición entrelazado es un patrón de barrido de disposición entrelazado unidireccional. Alternativamente, el patrón de barrido entrelazado puede ser un patrón de barrido entrelazado bidireccional. En una realización, el patrón de barrido de disposición entrelazado es un patrón de barrido de disposición entrelazado unidireccional en donde, en orden, se proporcionan primera, segunda y tercera líneas de barrido y la tercera línea de barrido está ubicada entre la primera y segunda líneas de barrido. Preferiblemente, una primera pasada mecaniza las líneas 1, $1+n$, $1+2n$, ... donde n es el número de pasadas para crear el barrido de disposición y n es mayor que 1. Una segunda pasada mecaniza las líneas 2, $2+n$, $2+2n$, ... con la línea 2 vecina y superpuesta a la línea 1, entre línea 1 y línea $1+n$, respectivamente. También puede estar presente una tercera pasada. La tercera pasada puede mecanizar las líneas 3, $3+n$, $3+2n$, con la línea 3 vecina y superpuesta a la línea 2, entre línea 2 y línea $1+n$, respectivamente.

30 Esto se puede expandir para proporcionar un patrón de barrido de disposición entrelazado general descrito por pasadas, i , formada por líneas: i , $i+n$, $i+2n$, ..., $i+kn$, donde i es el número de pasada y k y n son enteros mayores que 1.

Preferiblemente el proceso incluye calcular una superficie de contorno deseada para el material de vidrio. Preferiblemente el proceso incluye:

(a) proporcionar un haz láser;

(b) proporcionar un sistema óptico controlado por ordenador para dirigir el haz láser;

35 (c) proporcionar una etapa de traslación X-Y controlada por ordenador;

(d) localizar un material de vidrio en la etapa de traslación;

(e) operar el sistema óptico controlado por ordenador y la etapa de traslación para extirpar porciones del material de vidrio en un patrón de acuerdo con el primer aspecto y mecanizar de esa manera la superficie de contorno deseada en el material de vidrio.

40 Preferiblemente el proceso incluye calcular una superficie de contorno deseada a partir de un diseño óptico para un elemento óptico y el material de vidrio es un sustrato de vidrio monolítico. De esta forma, se produce un elemento microóptico que evita las etapas de escritura de utillaje o máscara de técnicas alternativas y proporciona una fabricación más rápida.

45 Preferiblemente las líneas de barrido vecinas se superponen. La superposición permite que los contornos se mecanicen en el material de vidrio. Preferiblemente, los puntos láser en la dirección de barrido se superponen. Preferiblemente la superposición está entre 90% y 99%.

50 El material de vidrio es un sustrato de vidrio. De esta forma, se pueden generar patrones de microfluidos en el material de vidrio. También se puede lograr perforación, fresado, texturizado y grabado de los materiales de vidrio. Más preferiblemente el sustrato de vidrio se selecciona a partir de un grupo que comprende: sílice fundida, vidrio corona de borosilicato, vidrio de titanato de alto índice y vidrio de pedernal.

Preferiblemente el láser es un láser de pulso ultracorto. Tal láser de pulso ultracorto puede ser un láser de picosegundos. El láser de picosegundos se puede operar a una longitud de onda de 1030 nm. Alternativamente el

láser de picosegundos se puede operar a una longitud de onda de 515 nm o 343 nm. Alternativamente se puede usar un láser de nanosegundos o un láser de femtosegundos.

5 Preferiblemente el proceso comprende una etapa de mecanizado y una etapa de suavización. Preferiblemente estas etapas se realizan usando el láser de pulso ultracorto. El láser de pulso ultracorto puede operar a menos de 10 ps. Más preferiblemente el láser de pulso ultracorto se opera a 6 ps. Preferiblemente el pulso ultracorto se opera a una tasa de repetición en el rango de 200 a 400 kHz. Alternativamente, el láser podría operar con un pulso tan corto como de 500 fs o con una tasa de repetición tan alta como 1MHz.

Preferiblemente un paso de entrelazado está entre 0.5 y 1.5 veces el tamaño de punto láser. Más preferiblemente el paso de entrelazado es igual al tamaño de punto láser.

10 Preferiblemente la etapa de mecanizado produce una conformación contorneada en el sustrato con una rugosidad de superficie, Ra, en el rango de 0.6 μm a 1.5 μm . Más preferiblemente el rango es de 0.6 μm a 1.2 μm .

Preferiblemente la etapa de suavización produce una conformación contorneada en el sustrato con una rugosidad de superficie, Ra, en el rango de 0.4 μm a 0.6 μm . Más preferiblemente Ra es menor que 0.5 μm .

15 Preferiblemente el proceso comprende una etapa de pulido. Más preferiblemente la etapa de pulido se realiza usando un láser de CO₂.

Preferiblemente la etapa de pulido produce una conformación contorneada en el sustrato con una rugosidad de superficie, Ra, superior a 100 nm.

20 Preferiblemente se proporcionan profundidades de ablación superiores a 300 μm . Más preferiblemente se proporcionan profundidades de ablación superiores a 500 μm . Se pueden proporcionar profundidades de ablación tal altas como 1000 μm .

Ahora se describirán realizaciones de la presente invención, solamente a modo de ejemplo, con referencia a:

La figura 1 es una ilustración esquemática de un patrón de barrido de disposición entrelazado de acuerdo con la presente invención;

25 La figura 2 es una ilustración de un proceso de mecanizado basado en láser para elementos ópticos de acuerdo con la presente invención;

La figura 3 es una ilustración de un sistema de mecanizado basado en láser para elementos ópticos de acuerdo con la presente invención;

Las figuras 4(a) y 4(b) muestran (a) profundidad de ablación y (b) rugosidad frente a paso normalizado (según diámetro de punto) para una superficie de sustrato mecanizada usando el método de la presente invención;

30 La figura 5 muestra profundidad de ablación contra fluencia para una superficie de sustrato mecanizada usando el método de la presente invención y el de un barrido de disposición estándar; y

Las figuras 6(a) y 6(b) muestran (a) profundidad de ablación y (b) rugosidad frente a fluencia para una superficie de sustrato mecanizada usando múltiples pasadas con el método de la presente invención.

35 Inicialmente se hace referencia a la figura 2 de los dibujos que ilustra un proceso, generalmente indicado mediante el número de referencia 10, para crear un elemento óptico de acuerdo con una realización de la presente invención. Aunque se describe un elemento óptico, el proceso se puede aplicar a cualquier material de vidrio con el fin de lograr el contorno de superficie y proporcionar efectos de perforación, fresado, texturizado y grabado en el material de vidrio. El proceso es particularmente adecuado para materiales con baja conductividad térmica tales como vidrio, plástico, cerámica y silicio.

40 En la primera etapa 12, se crea un diseño óptico para el elemento óptico y a partir de éste se calcula la conformación de contorno del elemento 16 óptico. Se genera un programa láser. En aplicaciones conocidas de micromecanizado por láser, se usan láseres de pulso para retirar una cantidad controlada de material con cada pulso. En particular, al variar la ubicación y energía de cada pulso suministrado, se puede generar una conformación neta.

45 El programa láser se introduce en una segunda etapa 34 que es una etapa de mecanizado basado en láser de pulso ultracorto. La segunda etapa 34 proporciona mecanizado a alta velocidad del elemento óptico para crear la conformación deseada. Este mecanizado se logra usando una técnica de mecanizado entrelazado en donde se realiza un barrido de disposición en el cual las líneas escaneadas no se realizan en secuencia sino que están entrelazadas. Este barrido entrelazado es como se ilustra en la figura 1.

50 Una etapa de suavización es la tercera etapa 36 en donde el haz desde el láser de picosegundo se desenfoca y se usa para suavizar los resaltes creados en la segunda etapa 34. Una cuarta etapa 38 es la etapa final, en donde se

usa un láser de CO₂ para realizar el pulido del elemento óptico. Se genera un baño de fusión poco profundo, lo que hace que el material refluya y reduzca la rugosidad del elemento óptico.

El programa láser de la primera etapa 12 se introduce en un sistema 14 de micromecanizado por láser. Ahora se hace referencia a la figura 3 de los dibujos que ilustra los componentes de un sistema 14 de micromecanizado por láser, para crear un elemento 16 microóptico. Un láser 18 está dispuesto delante de un ensamblaje 20 óptico controlado por ordenador 28. El ensamblaje 20 dirige el haz 22 láser de salida a un sustrato 24 sobre el cual se mecanizará la conformación deseada. El haz 22 se traslada sobre el sustrato 24 ya sea usando ópticas de barrido o trasladando la etapa 26 o una combinación de ambas.

El sustrato 24 es sílice fundida (típicamente una pieza de sílice fundida plana, de lados paralelos de 1 mm de espesor para elementos de alrededor de 5 mm en diámetro). El sustrato 24 puede ser cualquier vidrio pero preferiblemente sílice fundida (Corning HPFS 7980), N-BK7 (vidrio corona de borosilicato de Schott), STiH53 (vidrio de titanato de alto índice de Ohara) o NLaF21 (vidrio de pedernal de lantano de Schott). El sustrato 24 está montado sobre una etapa 26 de traslación XY, que está controlada por ordenador 28 para moverse en las etapas de 100 nm en las dos dimensiones. Una lente 30 de enfoque montada en una etapa 32 Z controlada por ordenador, enfoca el haz 22 sobre el sustrato, a una profundidad requerida para extirpar la sílice. Para la primera etapa 12, el láser 18 es un láser de picosegundos bombeado por diodos que proporciona pulsos de < 10 ps, idealmente 6 ps, a una tasa de repetición máxima de 400 kHz. El láser tiene una salida a 1030 nm con una potencia promedio de 50 W. También están disponibles para uso salidas de segundos y armónicas a 515 nm (potencia promedio de 25 W) y 343 nm (potencia promedio de 15 W). El ordenador 28 mueve las etapas 26, 32 en una configuración de disposición de tal manera que se logre la ablación controlada, mediante escritura láser pulso a pulso en un paso seleccionado, de la sílice 24 para crear la conformación deseada. Los expertos en la técnica reconocerán que el sistema 20 óptico podría basarse alrededor de un escáner Galvo con el sustrato 24 siendo mantenido en posición de tal manera que la disposición se cree mediante una pasada formada a través del escáner Galvo. Cuando se usa un láser CW, tal como un láser de CO₂ estabilizado en de longitud de onda, el sistema 20 óptico puede incluir un modulador acústico-óptico para crear pulsos si se desea. Tal sistema de micromecanizado por láser se describe en el documento US 9089927. En la presente invención, la etapa 38 de pulido usa un láser de CO₂ en modo CW.

Típicamente el tamaño de punto de haz 18 láser sobre el sustrato 24 corresponde a una cintura de haz Gaussiano de tal manera que el perfil de punto en la superficie que va a ser mecanizado es Gaussiano circular. Los diámetros de punto focal medidos (medidos en 1/e²) son 35.5 μm a 1030 nm (M² <1.3), 20 μm a 515 nm (M² <1.4) y 21 μm para 343 nm (M² <2.1). El mayor M² a 343 nm se debe a la degradación del cristal generador de tercer armónico.

En la presente invención la configuración de disposición no es el patrón estándar línea por línea sino un barrido de disposición unidireccional entrelazado como se ilustra con la ayuda de la figura 1. Este proceso emplea pasos de etapa y barrido que son idénticos al proceso de barrido de disposición de la técnica anterior. Sin embargo, para la primera pasada a través del área mecanizada, se mecanizan las líneas 1, 1+n, 1+2n, etc, donde n es un entero. Luego se hace una segunda pasada de mecanizado, donde se mecanizan las líneas 2, 2+n, 2+3n etc. La figura 1 muestra un ejemplo de un barrido 40 de disposición n=3. Están disponibles otros números. De esta forma, cada línea consecutiva está espaciada y paralela a la línea precedente, siendo el espacio llenado con líneas adicionales, cuya separación es uniforme y un múltiplo del espesor de línea es decir tamaño de punto láser. Las líneas pueden superponerse para reducir los resaltes que estarán presentes entre las líneas vecinas. Toda la superficie del sustrato 24 está mecanizada para proporcionar un barrido 40 de disposición entrelazado completo. Aunque se describen tres pasadas, se dará cuenta que un patrón de barrido de disposición entrelazado general se describe mediante pasadas, i, formadas por líneas: i, i+n, i+2n, ..., i+kn, donde i es el número de pasada y k y n son enteros mayores que 1. El barrido puede ser unidireccional, es decir cada línea se crea en la misma dirección, es decir, izquierda a derecha. Alternativamente, el barrido puede ser bidireccional, lo que permite que líneas se mecanicen en cualquier dirección, lo cual puede acelerar el proceso.

El proceso usa una forma especial de barrido de disposición en donde se usan múltiples pasadas, cinco en la figura 1, para obtener la superposición final de dirección de etapa. A diferencia del barrido secuencial de la técnica anterior en donde las líneas escaneadas subsecuentes están en secuencia, la técnica de barrido de la presente invención proporciona la superficie final omitiendo un número establecido de líneas y mecanizándolas en pasadas subsecuentes. La figura 1 muestra un ejemplo de una superficie mecanizada usando 15 líneas mecanizadas en la técnica de barrido entrelazado usando un entrelazado 3× Δy para simplificar siendo Δy la distancia entre el centro en líneas adyacentes en la dirección de etapa. En la técnica de barrido secuencial comúnmente usada, estas líneas se mecanizarían en secuencia desde 1 a 15 usando una disposición o pasada. Sin embargo en la técnica propuesta, la superficie se mecaniza mediante la primera pasada con un paso de disposición de 3× Δy dando las líneas 1, 4, 7, 10 y 13. Después de esto, el punto láser retorna a una posición Δy desde la primera línea y realiza la segunda pasada con un paso de disposición de 3× Δy dando las líneas 2, 5, 8, 11 y 14. Después de esto, el punto láser retorna a una posición 2× Δy desde la primera línea mecanizada y realiza la tercera pasada con un paso de disposición de 3× Δy dando las líneas 3, 6, 9, 12 y 15. Aunque este ejemplo muestra un barrido entrelazado de 3× Δy para simplicidad, este proceso puede tener la forma de n× Δy donde 'n' es un entero y n>1. Luego el proceso se realizará en 'n' número de pasadas. Adicionalmente en este ejemplo se usa un barrido unidireccional para simplicidad, no obstante, el proceso se puede describir tanto para la técnica de barrido unidireccional como bidireccional tanto en la dirección de etapa como de barrido.

Al separar líneas consecutivas de tal manera que no estén tocándose se evita el sobrecalentamiento de la superficie de sustrato 24. Aunque los láseres de pulso ultrarrápidos o ultracortos reducen los efectos térmicos, no se eliminan por completo. La contribución de acumulación térmica en el procesamiento con láser de pulso ultracorto está bien documentada, y de hecho puede aprovecharse para mejorar la eficiencia de procesos como soldadura. Sin embargo la acumulación térmica es un problema particular cuando se mecaniza vidrio por ejemplo en comparación con metales, debido a su baja conductividad térmica. Esto puede llevar a la formación de hebras filamentosas de vidrio, causadas por la rápida solidificación de chorros de vidrio fundido que se expulsan desde la superficie. El uso de una superposición de pulsos más baja proporciona una solución para evitar estos filamentos sin embargo la superficie producida es rugosa y el proceso es impredecible a una energía de pulso más baja. La presente invención da una solución mediante el uso del barrido entrelazado para proporcionar tiempo suficiente para la disipación de la energía térmica permitiendo que se use una superposición efectiva alta, proporcionando de este modo resultados de mecanizado relativamente suaves y predecibles con un R_a en el rango de $0.6 \mu\text{m} - 1.2 \mu\text{m}$.

El proceso de barrido entrelazado aprovecha el ángulo de superficie con respecto al haz. En el proceso de barrido secuencial de la técnica anterior, como el paso de etapa es pequeño, el haz incide en la pared de la superficie previamente mecanizada. Por tanto, la fluencia se reduce por el haz distorsionado y debido al ángulo de incidencia, los restos son empujados en la dirección opuesta a la pared donde el láser es incidente sobre el material. En la técnica de barrido entrelazado de la presente invención, debido al mayor paso usado, el láser incide sobre una superficie plana nueva en lugar de la pared de la pasada de mecanizado previa, por tanto tiene mejores características de absorción y los restos se expulsan mejor de la región mecanizada. La técnica de barrido entrelazado también separa temporalmente el mecanizado de la región reduciendo de esa manera la acumulación térmica.

En este caso, se define el punto láser como el punto individual hecho por cada pulso láser con un diámetro o tamaño de punto láser. El paso de etapa o paso de entrelazado es la distancia entre dos líneas escaneadas subsecuentes durante el mecanizado por láser y es la distancia de etapa determinada por n. El paso de barrido es la distancia entre dos puntos individuales producidos por pulsos láser subsecuentes es el paso de barrido. Esto se puede establecer ajustando la velocidad de barrido del láser considerando la tasa de repetición de pulso usada. La superposición de dirección de barrido es el paso de barrido descrito en términos de porcentaje de superposición considerando el diámetro de punto.

En la segunda etapa 34, el mecanizado entrelazado puede usar parámetros similares a los usados en el barrido de disposición convencional como se ilustra en la siguiente tabla:

Superposición (%)	Paso (μm)			Velocidad de barrido (mm/seg)		
	1030 nm	515 nm	343 nm	1030 nm	515 nm	343 nm
98.75	0.44375	0.25	0.25	8.875	5	5
97.5	0.8875	0.5	0.5	17.75	10	10
95	1.775	1	1	35.5	20	20
90	3.55	2	2	71	40	40

Los parámetros clave de superposición de barrido y superposición de etapa se eligen con el fin de proporcionar una comparación directa. Sin embargo, se puede usar una tasa de repetición más alta con la técnica de entrelazado, mientras que en este caso está limitada a 20 kHz, para evitar la expulsión de filamentos de vidrio y restos relacionados para el barrido de disposición convencional de la técnica anterior.

El proceso 10 usa un láser de pulso ultracorto (un láser de picosegundos a pulsos de 6 ps) para mecanizar con el método de barrido de disposición unidireccional entrelazado como la segunda etapa 34 para crear la conformación de superficie óptica deseada, mientras que se evita el sobrecalentamiento de la superficie de pieza de trabajo. La región mecanizada tiene una rugosidad algo grande (R_a típicamente $1.5 \mu\text{m}$), incluyendo resaltes claramente visibles.

La técnica de entrelazado fue probada para diferentes tamaños de etapa en comparación con el tamaño de punto láser para determinar el tamaño de etapa óptimo para una profundidad máxima con rugosidad mínima. Los resultados se trazan en las figuras 4(a) Profundidad de ablación (μm) 42 y (b) Rugosidad (μm) 44 como una función del paso de entrelazado normalizado, para 1030 nm, 515 nm y 343 nm con dos superposiciones diferentes (97.5% y 95%). En cada caso la tasa de repetición se mantiene a 20 kHz para evitar filamentos con valores bajos de n. Los resultados muestran profundidades máximas alcanzables en la longitud de onda más larga de 1030 nm con una superposición mayor de 97.5%. La rugosidad de etapa es bastante constante con el tamaño de paso para todas las longitudes de onda. Los resultados también muestran que la profundidad de ablación se maximiza cuando el paso de entrelazado es aproximadamente igual al tamaño de punto. La rugosidad es razonablemente constante hasta este valor; para valores mayores de n, se introducen muescas superficiales, aumentando de esa manera significativamente el valor de R_a . Por tanto se toma el valor óptimo de paso de entrelazado como el tamaño de punto láser.

Los resultados en la siguiente sección usan un barrido de entrelazado constante con un paso de $10 \times 1.8 \mu\text{m}$. Aunque los resultados de mecanizado son óptimos para un paso de entrelazado igual al diámetro de punto ($20 \times 1.8 \mu\text{m}$ para 1030 nm), estos mapas de parámetros se han creado a $10 \times 1.8 \mu\text{m}$. Para proporcionar una comparación directa con el proceso de barrido de disposición estándar, los resultados se trazan en la figura 5 para 1030 nm, usando un tamaño de punto de $35 \mu\text{m}$, superposición de 98.75 % para una tasa de repetición de 20 kHz. Aquí se traza la profundidad de ablación (μm) 42 frente a la fluencia (J/cm^2) 48 para un barrido 50 de disposición normal y el barrido 52 de disposición entrelazado. Para el barrido 50 de disposición de la técnica anterior, fueron logrables profundidades en el rango de 57 a $274 \mu\text{m}$. Sin embargo, para el barrido de disposición entrelazado de la presente invención fueron realizadas profundidades aumentadas en el rango de 240 a $660 \mu\text{m}$. Esto ilustra que están disponibles mayores rangos de profundidades de ablación usando la presente invención. Para la disposición 50 de barrido normal, fue registrada una rugosidad de 0.7 a $1.6 \mu\text{m}$ en comparación con 1.1 a $1.5 \mu\text{m}$ para el barrido 52 de disposición entrelazado. El aumento de rugosidad de superficie para el mecanizado de barrido 52 de disposición entrelazado se puede atribuir a los resaltes formados debido a la baja superposición de dirección de etapa.

Para los materiales de vidrio en particular, la alta superposición de dirección de barrido permite que el proceso de mecanizado sea más predecible al reducir la fluencia de umbral de ablación evitando de esa manera resultados de mecanizado inciertos. Dependiendo del material y resultado final, se puede usar una superposición de barrido más baja. La superposición de barrido no es aplicable a los láseres CW debido a la naturaleza continua de la salida.

Ahora se hace referencia a las figuras 6(a) y 6(b) que muestran resultados para el mecanizado de múltiples pasadas usando el proceso entrelazado, con el fin de proporcionar una ruta para la generación de estructuras más profundas. Estos usan 1030 nm, un tamaño de punto de $35 \mu\text{m}$, una superposición de 98.75% para una tasa de repetición de 20 kHz. La figura 6(a) traza la profundidad de ablación (μm) 42 frente a la fluencia (J/cm^2) 48 y la figura 6(b) traza la rugosidad de etapa R_a (μm) 44 frente a la fluencia (J/cm^2) 48 para una a cinco pasadas. Esto muestra que se pueden obtener profundidades de ablación hacia $1000 \mu\text{m}$ mientras que la rugosidad de superficie R_a es de alrededor de $0.8 \mu\text{m}$. Debe anotarse que el eje z no fue reenfocado en medio de barridos, por lo que la fluencia se reduce en pasadas subsecuentes, lo cual reduce un poco la eficiencia de retiro, mientras que tiene el efecto positivo de reducir la rugosidad de superficie. Por tanto considerando el láser de picosegundos usado, 1030 nm proporciona los mejores resultados de mecanizado. La estrategia de barrido de entrelazado permite el uso de altas tasas de repetición mientras que suprime la formación de filamentos. Por tanto se pueden usar altas tasas de repetición junto con múltiples pasadas para obtener estructuras más profundas.

La segunda etapa 34 ha mostrado el uso del barrido entrelazado para proporcionar tiempo suficiente para la disipación de la energía térmica permitiendo que se use una superposición efectiva alta, proporcionando de este modo resultados de mecanizado relativamente suaves y predecibles con un R_a en el rango de $0.6 \mu\text{m}$ - $1.2 \mu\text{m}$. Sin embargo esta rugosidad de superficie R_a es inadecuada para elementos microópticos.

De acuerdo con la presente divulgación, se puede prever introducir una etapa 36 de suavización posterior al proceso. Esto puede considerarse como una tercera etapa del flujo de proceso 10 que es una "pasada de suavización", donde el haz 22 del láser 18 de pulso ultracorto se desenfoca para proporcionar un punto en la superficie mecanizada de $75 \mu\text{m}$ y un proceso de disposición secuencial (es decir el de la técnica anterior) con una etapa de $1.8 \mu\text{m}$ con la dirección de barrido ortogonal a la dirección de barrido de entrelazado. Esto reduce los resaltes formados por el proceso 34 de mecanizado entrelazado. Usando energía de pulso de $42 \mu\text{J}$ y $z = \text{enfoco} + 1 \text{ mm}$, se produce un nivel de fluencia que provoca la ablación de una pequeña capa de la superficie y el punto más grande proporciona una mayor superposición creando de esa manera un efecto de suavización global. Por tanto el proceso de suavización se puede llevar a cabo usando un rango de parámetros (diámetro de punto, energía de pulso, velocidad de barrido y tasa de repetición). Sin embargo, dado que no induce la fusión ni reflujo, la superficie después del proceso de suavización todavía es ópticamente rugosa, es decir R_a de 0.6 a $0.4 \mu\text{m}$, y por lo que es inadecuada para aplicaciones ópticas.

Una etapa final proporciona la cuarta etapa 38 en una realización del proceso 10. Esta usa un proceso de pulido con láser de CO_2 como se conoce en la técnica para proporcionar un acabado ópticamente suave. La superficie del material se funde usando un haz láser de CO_2 con cuidado de mantener la temperatura de superficie por debajo de 2700°C (temperatura de vaporización). La profundidad, ancho y temperatura de baño de fusión se controlan cuidadosamente para asegurar que el vidrio fundido fluya bajo tensión superficial eliminando de esa manera los componentes de alta frecuencia no deseados mientras que se mantiene la forma de superficie (es decir los componentes de baja frecuencia diseñados). En esta etapa 38 se obtiene una R_a mejor que 100 nm .

Debe anotarse que el proceso de pulido solo está disponible para sílice fundida y es inadecuado para materiales con un CTE más alto.

La principal ventaja de la presente invención es que proporciona un proceso de mecanizado basado en láser que usa un barrido de disposición de entrelazado que aumenta la eficiencia de ablación y reduce la acumulación térmica en el mecanizado de materiales de vidrio.

Una ventaja adicional de una realización de la presente invención es que proporciona un proceso de mecanizado basado en láser que usa un barrido de disposición de entrelazado que aumenta la eficiencia de mecanizado de elementos ópticos.

Una aún ventaja de una realización de la presente invención es que proporciona un proceso de mecanizado basado en láser que usa un barrido de disposición de entrelazado que proporciona control de profundidad aumentado en el mecanizado de elementos ópticos.

- 5 Los expertos en la técnica apreciarán que se pueden hacer modificaciones a la invención en este documento descrita sin apartarse del alcance de las reivindicaciones. Por ejemplo, se pueden usar otros sistemas láser para mecanizar materiales alternativos con diferentes dimensiones. Aunque el proceso descrito se ha aplicado a láseres de pulso ultracortos se puede extender a otros láseres de pulso o CW.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Un proceso (10) de mecanizado basado en láser de escritura directa en donde en una etapa de mecanizado se controla un haz (22) láser para mecanizar un material (22) de vidrio en un barrido de disposición que proporciona líneas de barrido en un paso de etapa en una pasada de disposición para extirpar porciones del material de vidrio y mecanizar una superficie de contorno deseada en el material de vidrio para crear un elemento óptico y caracterizado porque: múltiples pasadas de disposición con líneas de barrido consecutivas de cada pasada de disposición que están separadas, proporcionan un patrón (40) de barrido de disposición entrelazado en el paso de etapa.
- 10 2. Un proceso (10) de mecanizado basado en láser de escritura directa de acuerdo con la reivindicación 1 en donde el patrón (40) de barrido de disposición entrelazado es un patrón de barrido de disposición entrelazado unidireccional en donde, en orden, se proporcionan primera y segunda líneas de barrido en una primera pasada de disposición, y se proporciona una tercera línea de barrido en una segunda pasada de disposición y la tercera línea de barrido está ubicada entre la primera y la segunda líneas de barrido.
- 15 3. Un proceso (10) de mecanizado basado en láser de escritura directa de acuerdo con la reivindicación 1 en donde el patrón (40) de barrido de disposición entrelazado es un patrón de barrido de disposición entrelazado bidireccional en donde, en orden, se proporcionan primera y segunda líneas de barrido en una primera pasada de disposición, se proporciona una tercera línea de barrido en una segunda pasada de disposición y la tercera línea de barrido está ubicada entre la primera y segunda líneas de barrido.
- 20 4. Un proceso (10) de mecanizado basado en láser de escritura directa de acuerdo con cualquier reivindicación precedente en donde el patrón (40) de barrido de disposición entrelazado se describe mediante pasadas, i , formadas por líneas de barrido: i , $i+n$, $i+2n$, ..., $i+kn$, donde i es el número de pasadas de disposición y k y n son enteros mayores que 1.
- 25 5. Un proceso (10) de mecanizado basado en láser de escritura directa de acuerdo con cualquier reivindicación precedente en donde el proceso incluye calcular una superficie de contorno deseada a partir de un diseño (12) para el material de vidrio.
- 30 6. Un proceso (10) de mecanizado basado en láser de escritura directa de acuerdo con la reivindicación 5 en donde el proceso incluye:
 - (a) proporcionar un haz (22) láser;
 - (b) proporcionar un sistema (20) óptico controlado por ordenador (28) para dirigir el haz láser;
 - (c) proporcionar una etapa (26) de traslación X-Y controlada por ordenador;
 - (d) ubicar el material (24) de vidrio en la etapa de traslación;
 - (e) operar el sistema óptico controlado por ordenador y la etapa (26, 32) de traslación para extirpar porciones del material de vidrio en un patrón de acuerdo con la reivindicación 5 y de esa manera mecanizar la superficie de contorno deseada en el material de vidrio.
- 35 7. Un proceso (10) de mecanizado basado en láser de escritura directa de acuerdo con cualquier reivindicación precedente en donde el material de vidrio es un sustrato de vidrio seleccionado a partir de un grupo que comprende: sílice fundida, vidrio corona de borosilicato, vidrio de titanato de alto índice, y vidrio de pedernal.
- 40 8. Un proceso (10) de mecanizado basado en láser de escritura directa de acuerdo con la reivindicación 6 en donde el haz (22) láser se proporciona por un láser (18) de pulso ultracorto.
- 40 9. Un proceso (10) de mecanizado basado en láser de escritura directa de acuerdo con la reivindicación 5 en donde el proceso incluye calcular una superficie de contorno deseada a partir de un diseño (12) óptico para un elemento (16) óptico.
- 45 10. Un proceso (10) de mecanizado basado en láser de escritura directa de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 6 a 9 en donde el proceso comprende una etapa (34) de mecanizado y una etapa (36) de suavización.
- 45 11. Un proceso (10) de mecanizado basado en láser de escritura directa de acuerdo con cualquier reivindicación precedente en donde un paso de entrelazado está entre 0.5 y 1.5 veces un diámetro de punto láser.
12. Un proceso (10) de mecanizado basado en láser de escritura directa de acuerdo con la reivindicación 10 o reivindicación 11 en donde el proceso comprende una etapa (38) de pulido.
13. Un proceso (10) de mecanizado basado en láser de escritura directa de acuerdo con la reivindicación 12 en donde la etapa de pulido se realiza usando un láser de CO₂.

14. Un proceso (10) de mecanizado basado en láser de escritura directa de acuerdo con cualquier reivindicación precedente en donde se mecanizan profundidades de ablación entre 300 μm y 1000 μm en el material de vidrio.

15. Un proceso (10) de mecanizado basado en láser de escritura directa de acuerdo con la reivindicación 14 en donde se mecanizan profundidades de ablación entre 500 μm y 1000 μm en el material.

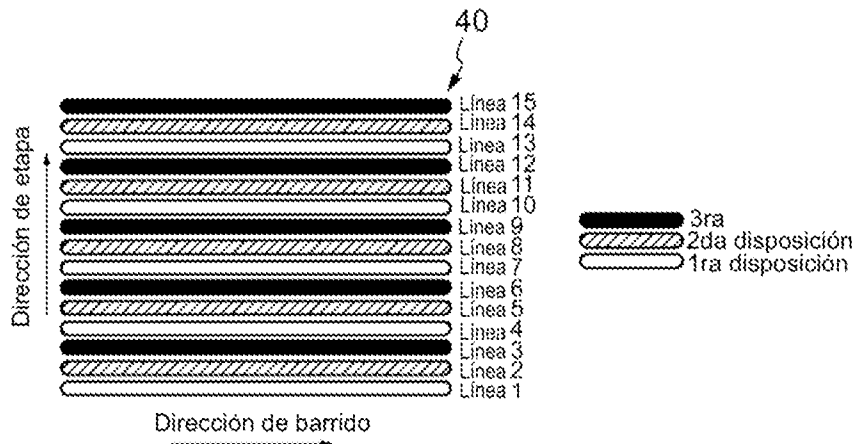


Fig. 1

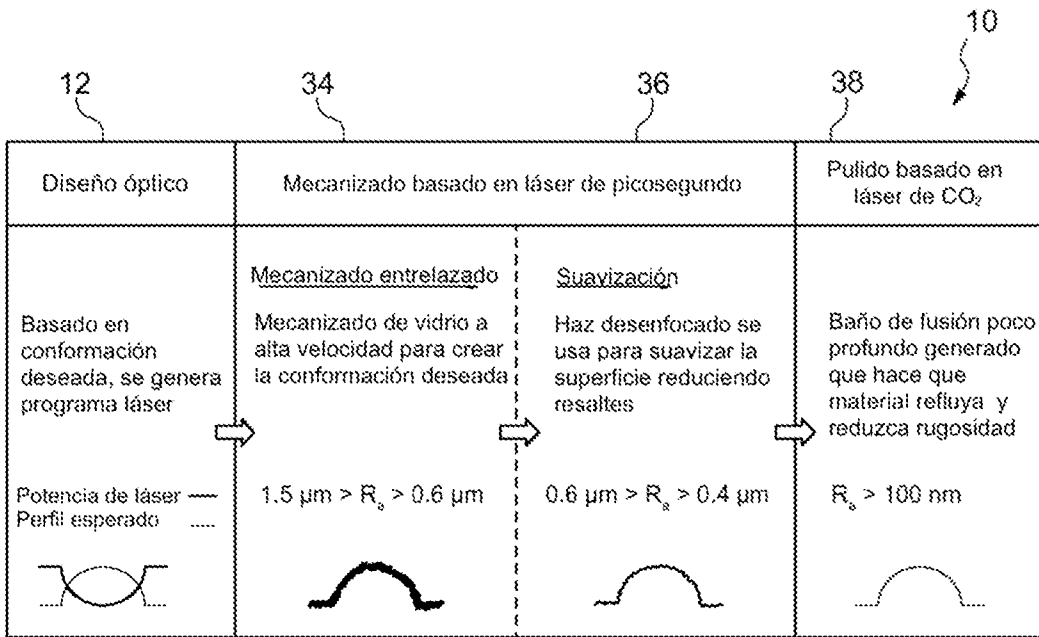


Fig. 2

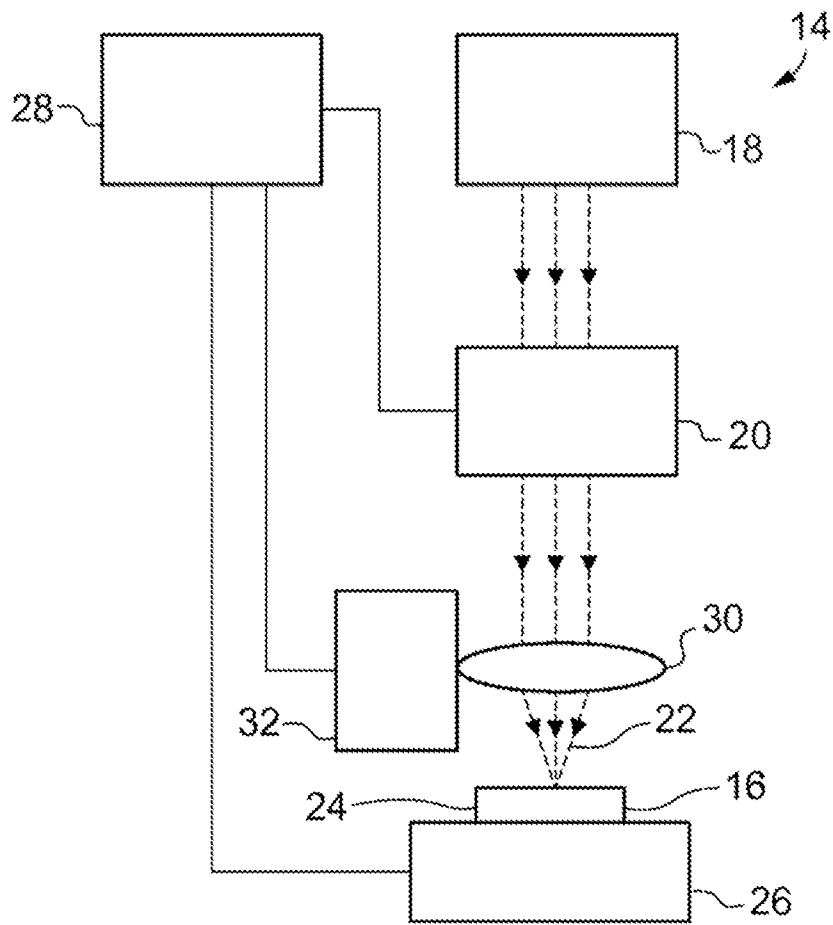
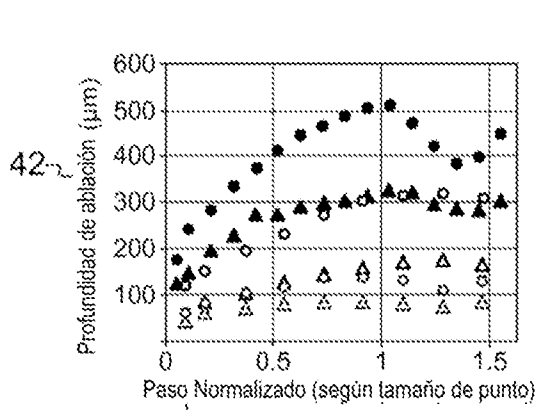
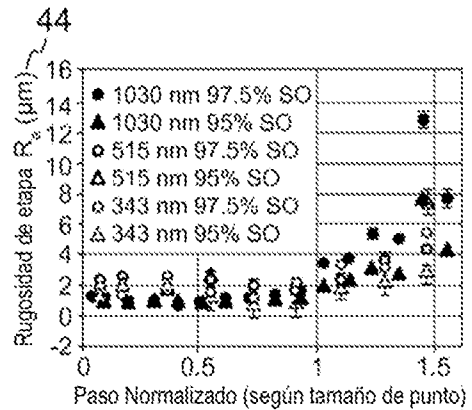


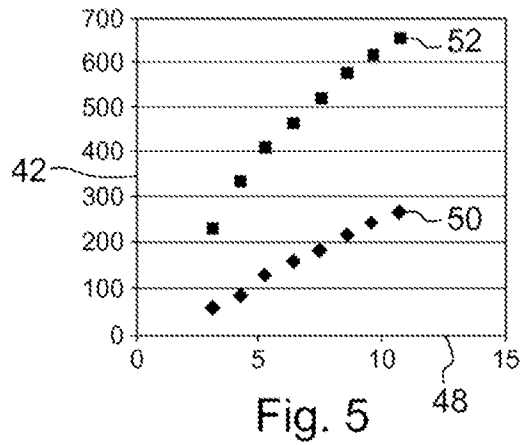
Fig. 3



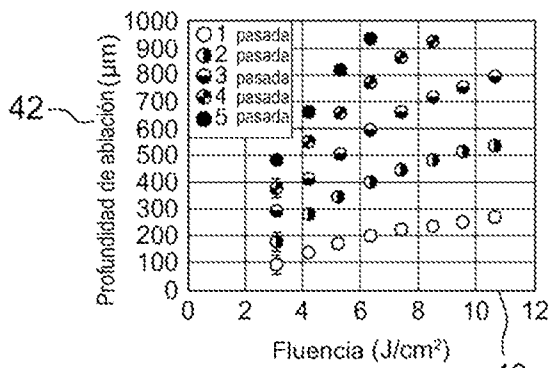
46 Fig. 4(a)



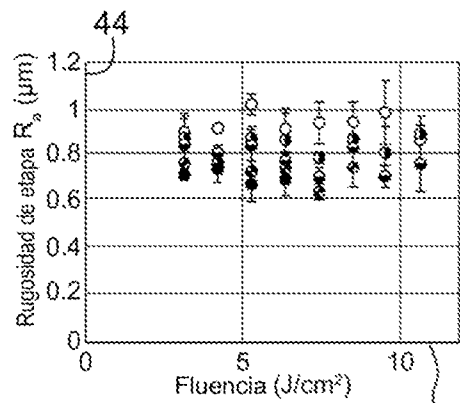
46 Fig. 4(b)



48 Fig. 5



48 Fig. 6(a)



48 Fig. 6(b)