



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



① N.º de publicación: **ES 2 041 587**

② Número de solicitud: 9200219

⑤ Int. Cl.⁶: B29D 11/00
B23K 26/00

⑫

PATENTE DE INVENCION

B1

② Fecha de presentación: **04.02.92**

④ Fecha de publicación de la solicitud: **16.11.93**

Fecha de concesión: **30.08.96**

⑤ Fecha de anuncio de la concesión: **01.10.96**

⑤ Fecha de publicación del folleto de patente:
01.10.96

⑦ Titular/es: **Universidad Politécnica de Cataluña
Av. Gregorio Marañón s/n
08028 Barcelona, ES**

⑦ Inventor/es: **Laguarda Bertrán, Ferrán**

⑦ Agente: **No consta**

⑤ Título: **Procedimiento de pulido de vidrios ópticos mediante tratamiento térmico superficial con láser.**

⑤ Resumen:

Un nuevo método de obtención de superficies ópticas pulidas en vidrios convencionales utilizados en la industria óptica. Se trata, fundamentalmente, de un tratamiento térmico superficial realizado mediante la aplicación controlada de un haz de un láser de CO₂ sobre la superficie de la muestra a pulir. La fuerte absorción por parte del material de la radiación de longitud de onda 10.6 micras procedente del láser provoca el reblandecimiento de una fina capa de material, la cual fluye, bajo la acción de la tensión superficial, disminuyendo su rugosidad. El proceso se completa con una etapa final de enfriamiento controlado y resolidificación de la muestra. Puede aplicarse indistintamente a superficies de cualquier topografía con rugosidades iniciales del orden de 1-10 micras, obteniéndose después del proceso una superficie con una rugosidad máxima inferior a 30 nm.

ES 2 041 587 B1

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el artº 37.3.8 LP.

DESCRIPCION

1.- Título

Procedimiento de pulido de vidrios ópticos mediante tratamiento térmico superficial con láser.

2.- Sector de la técnica

Fabricación de componentes ópticos refractivos.

3.- Estado de la técnica

El nivel de pulido de una superficie óptica se caracteriza a partir de dos parámetros:

- (a). La relación entre la energía de la luz difusa y la energía de la luz incidente sobre una superficie (ED/EI).
- (b). La rugosidad de la superficie, la cual se caracteriza a partir de parámetros tales como la rugosidad máxima R_y o la rugosidad media R_a (Normas ISO 468-1982, ANSI B46.1.1985, AFNOR e 05-015).

Se distinguen tres tipos de pulido (M. R. Touvy, Table ronde sur le polissage du verre. Union Scientifique Continentale du Verre. Bruxelles, 1960), que se relacionan en la Tabla 1.

TABLA 1.

Niveles de pulido de superficies ópticas

Niveles de pulido	(ED/EI)	R_y (nm)	Aplicación
Óptico convencional	10^{-2}	<50	Óptica convencional y oftálmica
Óptico de precisión	10^{-4}	~ 5	Instrumentos de precisión (objetivos, oculares, etc). Óptica láser.
Super óptico	10^{-6}	$\sim 0,5$	Óptica láser de elevadas prestaciones (láseres pulsados de alta potencia). Instrumentos especiales.

A continuación se presenta una breve explicación de los métodos y técnicas utilizados por la industria óptica para la obtención de superficies ópticas pulidas:

3.1.- *Tecnologías de pulido mecánico*

Son las más utilizadas industrialmente en la fabricación de componentes ópticos y las que mejores resultados proporcionan en la actualidad.

Se distinguen tres técnicas distintas para obtener el pulido mecánico:

3.1.1.- *Pulido mecánico con abrasivos blandos*

Se basa en la acción de un elemento abrasivo blando - de dureza similar o inferior a la del material a pulir -, normalmente en medio acuoso, que se frota sobre la superficie a pulir mediante un molde que se adapta a la forma de dicha superficie.

Si bien no existe una teoría que explique perfectamente la eficacia de esta técnica, se admite que el abrasivo ejerce una triple acción: abrasiva, térmica y físico-química sobre la superficie (M.I. Psychés, Table ronde sur le polissage du

verre. Union Scientifique Continentale du Verre, Bruxelles 1960; D.F. Horne, Adam Hilger Ltd., Bristol, 1972; J.P. Marioge, Nouv. Rev. Optique, t 6, v 2, pp. 121-126, 1975).

La utilización de esta técnica requiere largos tiempos de preparación de las máquinas utilizadas, debiéndose instalar en ellas el molde adecuado para cada forma de superficie a pulir.

Recientemente se ha desarrollado una variante de este método en la que se sustituye el molde por útil de pequeño tamaño cuyo movimiento reproduce el perfil de una superficie de revolución previamente programado en un ordenador. Esta técnica se ha aplicado a la fabricación de superficies esféricas de muy elevada precisión (G. Hull-Allen and G. Gunnarsson, Photonics Spectra, pp. 147-156, March 1990).

3.1.2.- *Pulido mecánico con abrasivos duros*

Se basa en el mismo método descrito anteriormente, pero utilizando abrasivos de mayor dureza que la del material a pulir (por ejemplo, óxido de aluminio o polvo de diamante). La superficie pulida se consigue reduciendo progresivamente la granulometría del citado abrasivo (Roger M. Wood, Adam Hilger, Bristol and Boston, 1986). Esta técnica presenta el mismo inconveniente que la anterior por lo que se refiere a la necesidad de instalación de los moldes adecuados a cada forma de superficie.

3.1.3.- *Torneado con diamante*

Se basa en un mecanizado de la superficie mediante útiles de diamante. Esta técnica ha sido adoptada para la fabricación de superficies ópticas en una gran variedad de metales (por ejemplo, en la fabricación de espejos de cobre), aunque también se utiliza con éxito en otros materiales no metálicos (Roger M. Wood, Adam Hilger, Bristol and Boston, 1986). Sin embargo, esta técnica no suele aplicarse en la obtención industrial de componentes ópticos refractivos fabricados con vidrios convencionales.

3.2.- *Tecnología de pulido al fuego*

Este tipo de pulido se realiza a temperaturas relativamente elevadas, para las que la viscosidad es baja y el vidrio puede fluir, bajo la acción de la tensión superficial, disminuyendo la rugosidad de la superficie (E. Plumet, Table ronde sur le polissage du verre. Union Scientifique Continentale du Verre. Bruxelles, 1960; M.I. Psychés, Table ronde sur le polissage du verre Unión Scientifique Continentale du Verre, Bruxelles, 1960). Durante esta operación de pulido al fuego debe evitarse la deformación macroscópica de la superficie, por lo que la temperatura de la muestra debe ser siempre inferior a la temperatura de deformación del vidrio. Este extremo es especialmente crítico en la fabricación de componentes ópticos, ya que las deformaciones máximas aceptables de una superficie fabricada respecto a la superficie teórica ideal son extraordinariamente pequeñas (en lentes oftálmicas, por ejemplo, del orden o inferiores a 1 micra).

Esta limitación en la temperatura impide un flujo superficial rápido, lo cual motiva largos tiempos de permanencia de las muestras en los hornos para su pulido al fuego. Si se reduce este tiempo de pulido, las superficies presentan una rugosidad residual de baja frecuencia espacial.

En la práctica, esta técnica sólo se aplica a la fabricación de componentes ópticos refractivos dedicados al transporte y manipulación de luz (por ejemplo, colimadores y proyectores de luz), pero no a los dedicados a la formación de imágenes de elevada calidad, en los que la rugosidad residual mencionada resultaría inaceptable.

Se han propuesto y desarrollado técnicas consistentes en calentar de manera selectiva la superficie de muestras llevadas previamente a temperaturas superiores al punto de transformación (para evitar al choque térmico del vidrio), mediante la aplicación de llamas oxhídricas, pero este método, debido a la inestabilidad y falta de uniformidad características de las llamas, se ha aplicado únicamente en la fabricación de vidrio hueco (F. Virey et L. Prod'Homme, *Verres et Réfractaires*, vol 40, n. 6, 1986).

3.3.-Pulido con haces de energía

Esta técnica consiste en la aplicación sobre una superficie óptica de un haz dirigido de energía (láser, electrones o iones). Se aplica a componentes ópticos destinados a soportar intensidades de radiación muy elevadas (por ejemplo, en haces de láseres pulsadores de Nd. YAG), con objeto de aumentar la calidad de la superficie y, consecuentemente, aumentar el valor del umbral de daño inducido por láser (en inglés, "Laser induced damage threshold" o LIDT).

En el caso de aplicación de un haz de radiación láser, este efecto de "pulido" se debe a un recocido (en inglés, annealing) localizado en la superficie del componente, mientras que en el caso de aplicación de haces de electrones o iones, el proceso que se genera es parecido a un "grabado" (en inglés, etching) de dicha superficie. Esta técnica se ha aplicado a materiales utilizados en tecnología láser o en óptica integrada, tales como Si, Ge, ZnSe, LiNbO₃, sílice fundida fundida, etc. En todos los casos, la aplicación del haz de energía se realiza sobre superficies previamente pulidas con técnicas mecánicas, con el único objeto de incrementar su resistencia frente a elevadas intensidades de radiación láser (P.A. Temploe and M.J. Soileau, *Natl. Bur. Stand. (U.S.), Spec. Publ. 620*, pp. 180, 1980; P.A. Temple, W.H. Lowdermilk and D. Milam, *Appl. Opt.*, vol 21, pp. 3249, 1982).

Sin embargo, existe un estudio realizado por Y.M. Xiao y M. Bass (X.M. Xiao and M. Bass, *Appl. Opt.*, vol 22, n. 18, pp. 2933-2936, 1983) en el que aplican la técnica del "pulido" con haz láser de CO₂ a distintas muestras de vidrios. Como resultado de este estudio los autores concluyen que: "los vidrios con bajos coeficientes de dilatación térmica pueden pulirse con láser, mientras que otros vidrios no". En particular, han obtenido resultados satisfactorios en vidrios Pyrex y en cuarzo fundido, partiendo de muestras previamente pulidas por medios mecánicos, mientras que en muestras de vidrios convencionales utilizados en la industria óptica, como BK-7 o Zerodur, se producían grietas o fracturas en el proceso de enfriamiento, incluso aunque las muestras se hubiesen calentado antes de la aplicación del haz de radiación láser.

3.4.-Otras técnicas de pulido

Existen también otras técnicas de pulido, tales

como el pulido al ácido o el pulido por fractura, que han sido ampliamente estudiadas (M.L. Dubrul, *Table ronde sur le polissage du verre*. Union Scientifique continentale du Verre, Bruxelles, 196; M.P. Acloque, *Table ronde sur le polissage du verre*. Union Scientifique Continentale du Verre, Bruxelles, 1960). Sin embargo, ninguna de estas técnicas ha demostrado ser competitiva con los distintos métodos de pulido mecánico y, de hecho, no se utilizan en la actualidad para la obtención de superficies pulidas en componentes ópticos refractivos.

4.-Breve descripción de la invención

Se trata de un nuevo método de obtención de superficies ópticas pulidas en vidrios convencionales utilizados en la industria óptica. Consiste, fundamentalmente, en un tratamiento térmico superficial realizado mediante la aplicación controlada, temporal y espacialmente, de un haz de un láser CO₂ sobre la superficie de la muestra a pulir, la masa de la cual debe haberse calentado previamente hasta una temperatura superior al punto de transformación. La fuerte absorción por parte del material de la radiación de longitud de onda 10.6 micras procedente del láser provoca el reblandecimiento de una fina capa de material, la cual fluye, bajo la acción de la tensión superficial, disminuyendo su rugosidad. El proceso se completa con una etapa final de enfriamiento controlado y resoludificación de la muestra. Puede aplicarse indistintamente a superficies de cualquier forma y tamaño, con rugosidades iniciales del orden de 1 a 10 micras, obteniéndose después del proceso una superficie con una rugosidad máxima inferior a 30 nm.

Para muestras de vidrios convencionales, el tiempo de calentamiento previo hasta temperaturas superiores al punto de transformación puede conseguirse en tiempos del orden de 30 minutos, el tiempo de aplicación de la radiación del láser de CO₂ para obtener el pulido de la superficie es del orden de 1 a 5 segundos, y el tiempo de enfriamiento puede ser del orden de 60 a 90 minutos.

Por consiguiente, este proceso constituye una alternativa claramente competitiva frente a las técnicas de pulido mecánico convencional, puesto que, por una parte, no requiere la preparación específica de la maquinaria para cada tipo de superficie a fabricar y, por otra parte, puede llegar a ofrecer cadencias de fabricación extraordinariamente elevadas. Además, en ningún momento se ejerce un contacto mecánico directo sobre la muestra ni se requiere la utilización de abrasivos.

5.-Descripción de la invención

A continuación, se detalla la secuencia de etapas a realizar para realizar el proceso propuesto de pulido láser sobre una superficie óptica de un vidrio convencina con una rugosidad inicial del orden de 1 10 micras. También se especifican para cada etapa la justificación científica y/o técnica, así como las posibles variaciones respecto al método propuesto.

5.1.-Limpieza de la muestra

En primer lugar, se debe someter a la muestra a un proceso de limpieza y secado que asegure la eliminación de los restos de material abrasivo utilizado en la etapa de generación de la superficie, así como los pequeños fragmentos de vidrio

que puedan haber quedado incrustados en dicha superficie.

5.2.-Acondicionamiento térmico

A continuación, se somete a la muestra a un proceso de calentamiento controlado en un horno limpio convencional, con objeto de situar la masa de vidrio del componente a tratar a una temperatura superior al punto de transformación. De esta manera, evitaremos en cualquier proceso de tratamiento térmico posterior la generación de tensiones mecánicas importantes derivadas de la existencia de gradientes térmicos en el entorno de dicho punto. Esta etapa de acondicionamiento térmico no es estrictamente necesaria, puesto que también es posible obtener resultados satisfactorios partiendo de muestras a temperatura ambiente o, en general, por debajo del punto de transformación. Sin embargo, en estas condiciones el tratamiento térmico con láser debe prolongarse durante un tiempo tal largo (para evitar la generación de gradientes térmicos excesivos) que el proceso no resulta competitivo.

5.3.-Tratamiento térmico con láser

Seguidamente, se irradia la superficie de la muestra a tratar con el haz de un láser de CO₂ controlado temporal y espacialmente. La parte no reflejada de la energía del haz láser a 10.6 micras se depositará íntegramente en una delgada capa superficial de la muestra y se propagará por conducción hacia su interior obteniéndose, en cada instante de tiempo, una distribución de temperatura en función de la profundidad. Esta distribución de temperatura implica la correspondiente distribución en profundidad del valor del coeficiente de viscosidad del vidrio. Al tratarse de un proceso de aportación localizada de energía, la temperatura será tanto mayor cuanto más cerca se encuentre un punto del material del foco de calor, es decir, de la superficie. Por consiguiente habremos dotado al material de una capacidad de fluir - bajo la acción de las fuerzas debidas a la tensión superficial - tanto mayor cuanto más cerca se encuentre éste de la superficie.

Se ha realizado la simulación por ordenador del proceso de tratamiento térmico superficial con láser, resolviendo numéricamente la ecuación diferencial unidimensional de difusión del calor por conducción para los valores característicos de los parámetros térmicos del vidrio convencional. Se ha observado que, aplicando ciclos adecuados de calentamiento, se generan en la zona superficial de la muestra las distribuciones de temperatura óptimas para obtener el flujo y pulido superficial del vidrio sin distorsionar la forma macroscópica de la superficie. Una de las características más relevantes del proceso consiste en que, debido a su elevada eficiencia térmica, se pueden generar gradientes térmicos muy elevados, por lo que, aunque en una fina capa superficial se alcancen temperaturas superiores al denominado punto de deformación del vidrio, el flujo resultante no se traduce en una deformación macroscópica de la superficie y, además, permite obtener valores del coeficiente de viscosidad muy pequeños con lo que el tiempo de pulido superficial resulta ser extraordinariamente corto. Esta característica constituye el hecho diferencial básico de la técnica propuesta en relación con la tecnología de pulido al

fuego descrita anteriormente en el apartado 3.

Los experimentos realizados han permitido demostrar que el modelo numérico de simulación describe correctamente la evolución real del proceso. También hemos comprobado que programando ciclos de calentamiento adecuados con duraciones comprendidas entre 1 y 5 segundos, se obtienen superficies con una rugosidad máxima inferior a 30 nm. Así pues, la calidad de la superficie es igual o superior a la obtenida en un pulido óptico convencional.

Un aspecto que ha resultado ser extraordinariamente crítico a lo largo del estudio experimental es el de la generación de gradientes térmicos transversales en la superficie de la muestra tratada. La aparición de estos gradientes se debe a la falta de uniformidad en la distribución transversal de intensidad en un haz de radiación de un láser convencional. Al ser el proceso de calentamiento tan rápido y la velocidad de propagación del frente calorífico en la masa de vidrio bastante lenta, la no uniformidad de la distribución energética transversal del haz de radiación incidente se traduce en una no uniformidad de la distribución transversal de temperatura, generándose deformaciones macroscópicas superficiales que reproducen esta distribución. La solución para este problema consiste en obtener, mediante una adecuada manipulación del haz de radiación láser, una distribución efectiva de intensidad que sea uniforme simultáneamente en toda la zona de la superficie a tratar.

Existe también otra posibilidad para obtener un pulido uniforme sobre toda la superficie que podría realizarse con láseres de menor potencia aunque empleando tiempos mucho más largos. Consiste en hacer pasar el haz láser por un sistema óptico compuesto por una lente focalizadora y por un axicón. Con ello se obtiene una distribución anular de intensidad sobre la muestra, cuyo radio depende de la posición relativa entre los dos componentes. Desplazando a velocidad variable la lente respecto al axicón se consigue barrer radialmente la superficie óptica a pulir, generándose en ella un "frente" de pulido.

Finalmente, cabe señalar que cuanto mayor sea la curvatura de una superficie óptica, mayor será también la diferencia de intensidades de radiación láser efectivas proporcionadas por un haz de distribución uniforme incidente sobre ella. Obviamente, una zona sobre la que el haz incida perpendicularmente, recibirá una intensidad efectiva mayor que otra zona sobre la que el haz incida con un ángulo distinto. Sin embargo, el margen operativo observado en la programación del ciclo de calentamiento con láser resulta ser suficiente para obtener el pulido completo de superficies ópticas de elevada curvatura a partir de la irradiación simultánea de toda la superficie.

Por otra parte, existe acualmente en las industrias óptica y oftálmica una tendencia hacia la fabricación de superficies esféricas de baja curvatura, para las que la técnica propuesta resultaría ser especialmente adecuada.

5.4.-Enfriamiento

El proceso de calentamiento y flujo superficial se completa con una etapa posterior de enfriamiento, la cual puede dividirse en dos fases:

- (a). En primer lugar, se procede a la homogeneización de los gradientes térmicos inducidos en la fase de calentamiento con el láser. Si bien no resulta imprescindible, esta fase puede ser parcialmente conducida y ralentizada por el propio láser, programando un ciclo de enfriamiento con la aportación decreciente de intensidades pequeñas de radiación. Esta fase puede tener una duración del orden de 5 segundos.

Cabe señalar que la temperatura media de la muestra de vidrio prácticamente no varía respecto a la temperatura inicial a la que se encontraba antes del tratamiento térmico con el láser. Esto es debido a que la aportación global de energía calorífica es muy pequeña en comparación con la elevada capacidad calorífica del componente óptico cuya superficie se está tratando.

- (b). La muestra homogeneizada térmicamente se conduce lentamente hasta temperatura ambiente en un proceso de enfriamiento controlado en un horno limpio. Este proceso es bien conocido en la industria óptica, puesto que se utiliza en el recocido del vidrio, y presenta un punto crítico de paso a través del intervalo de transformación en el que deben eliminarse todas las tensiones existentes en el seno del vidrio. Esta fase puede tener una duración aproximada del orden de 60 a 90 minutos.

Ejemplo

A continuación, a título de ejemplo, se detallan los valores de todos los parámetros técnicos mencionados en la descripción del proceso en el caso de un proceso de pulido realizado con la técnica propuesta sobre una muestra de un vidrio crown convencional del tipo B-270 o BK-7.

Se parte de una muestra finada ($R_y = 1$ micra) y limpia.

Se aplica un ciclo de calentamiento de aproximadamente 30 minutos hasta una temperatura uniforme de 550°C .

Se realiza un ciclo de calentamiento con el haz de un láser de CO_2 , con una distribución transversal de intensidad uniforme, aplicando sobre la superficie de la muestra valores de intensidad variable en el tiempo comprendidos entre 0 W/cm^2 y 80 W/cm^2 .

La temperatura máxima alcanzada en la capa superficial de la muestra de vidrio es del orden de 1000°C . El gradiente térmico máximo alcanzado en la superficie es del orden de 250° C/mm .

El tiempo de flujo superficial observado es del orden de varias centésimas de segundo.

Se realiza un ciclo de enfriamiento controlado hasta valores cercanos a la temperatura ambiente durante un tiempo aproximado de 90 minutos.

Se observa en la superficie tratada un valor de rugosidad máxima R_y inferior a 30 nm y una rugosidad media R_a inferior a 5 nm. No se observan deformaciones macroscópicas de la superficie.

35

40

45

50

55

60

65

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de pulido de vidrios ópticos mediante tratamiento térmico superficial con láser, sobre materiales de elevado coeficiente de dilatación lineal, **caracterizado** por la aplicación controlada sobre la superficie a pulir de un haz de radiación a 10,6 micras procedente de un láser de CO₂.

2. Procedimiento de pulido de vidrios ópticos mediante tratamiento térmico superficial con láser según la reivindicación 1, **caracterizado** por un acondicionamiento térmico previo al tratamiento por láser, consistente en un proceso de calentamiento controlado en un horno limpio convencional, con objeto de situar la masa de vidrio del componente a tratar a una temperatura superior al punto de transformación.

3. Procedimiento de pulido de vidrios ópticos

mediante tratamiento térmico superficial con láser según las reivindicaciones 1 y 2, **caracterizado** por una etapa posterior de enfriamiento controlada y resolidificación de la muestra, que incluye un proceso de homogeneización de los gradientes térmicos inducidos en la fase de tratamiento con el láser.

4. Procedimiento de pulido de vidrios ópticos mediante tratamiento térmico superficial con láser según la reivindicación 1, para la obtención de superficies de vidrio esféricas y de superficies de vidrio que no sean de revolución.

5. Procedimiento de pulido de vidrios ópticos mediante tratamiento térmico superficial con láser según la reivindicación 1, **caracterizado** por permitir el tratamiento simultáneo de varias superficies de un componente óptico en un mismo proceso.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65



INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

⑤ Int. Cl.⁶: B29D 11/00, B24B 13/00, B23K 26/00

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
Y	WO-8700120-A (MINNESOTA MINING AND MANUFACTURING COMPANY) 15.01.87 * Página 5, línea 15; reivindicación 3 *	1-3
Y	US-5053171-A (PORTNEY et al.) 01.10.91 * Columnas 1,2 *	1
Y	EP-171975-A (AMERACE CORPORATION) 19.02.86 * Páginas 4,5 *	2,3
A	EP-366355-A (BAUSCH & LOMB BERMUDA TECHNOLOGY) 02.05.90 * Columna 1, líneas 24-52 *	1
A	EP-366356-A (BAUSCH & LOMB BERMUDA TECHNOLOGY) 02.05.90 * Columna 1, líneas 5-16 *	1
A	EP-463237-A (HUGO KERN UND HEBERS GMBH & CO.) 24.12.90 * Reivindicación 1 *	1

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones n.º:

Fecha de realización del informe

07.02.96

Examinador

S. Fernández Díez-Picazo

Página

1/1