



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 361 452**

51 Int. Cl.:
B23K 26/14 (2006.01)
B23K 26/38 (2006.01)
B23K 26/40 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **08701755 .4**
96 Fecha de presentación : **07.01.2008**
97 Número de publicación de la solicitud: **2104587**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **30.09.2009**

54 Título: **Proceso para el corte por láser de un material no metálico.**

30 Prioridad: **08.01.2007 GB 0700271**
05.03.2007 GB 0704216
23.11.2007 GB 0723029

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
17.06.2011

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
17.06.2011

73 Titular/es: **SPI Lasers UK Limited**
3 Wellington Park Tollbar Way
Hedge End Southampton SO30 2QU, GB

72 Inventor/es: **Hoult, Anthony, Paul;**
Gabzdyl, Jacek, Tadeusz y
Varnham, Malcolm, Paul

74 Agente: **Carvajal y Urquijo, Isabel**

ES 2 361 452 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

Proceso para el corte por láser de un material no metálico

Esta invención se refiere a un proceso para el corte por láser de un material no metálico.

5 Tradicionalmente, los dispositivos semiconductores fabricados sobre una oblea semiconductora se separan entre sí normalmente utilizando sierras de diamantes. Para impedir la formación de grietas, la velocidad del proceso de aserrado se limita normalmente a menos de 1 m/min. Serían deseables velocidades superiores para reducir costos.

Asimismo, las células solares fabricadas de polisilicio se separan tradicionalmente con sierras. Los sustratos de polisilicio son muy finos, y la velocidad del proceso de aserrado se limita para impedir el astillado.

10 La patente de EE. UU. número 4 224 101, de Tijburg y otros, describe un proceso para separar dispositivos semiconductores desarrollados sobre una oblea, en el cual se utiliza un láser para trazar la oblea mediante cortar ranuras en su superficie. El proceso de trazado produce contaminación debido al silicio policristalino que se adhiere a la superficie de la oblea. Tijburg y otros describen cómo esta contaminación puede ser eliminada mediante el subsiguiente ataque con ácido, antes de la finalización del proceso de separación por rotura a lo largo de las ranuradas trazadas.

15 La patente de EE. UU. número 4 545 464, de Takeuchi, da a conocer que el trazado por láser puede tener como resultado la formación de micro-grietas, en concreto en obleas de silicio o de zafiro en las que las micro-grietas se forman cuando se hace pasar el láser en direcciones concretas. Takeuchi evita dichas micro-grietas trazando por láser en direcciones en las cuales no se forman las micro-grietas.

20 La patente de EE. UU. número 5 916 460, de Imoto y Sato, estudia los problemas de micro-grietas que se producen con haces de láser de CO₂ cuando se trocean dispositivos semiconductores sobre sustratos de vidrio o cerámicos. El aparato que describen contiene una guía y una toma de gas. El gas rodea el haz de láser cuando éste es enfocado sobre la superficie del semiconductor, y se utiliza el gas para retirar los residuos emitidos durante el proceso de corte. Cuando la potencia del láser se fija a un valor demasiado alto, el sustrato se fragmenta debido a un fenómeno de evaporación. Se generan muchas grietas en la superficie, el reverso, y en planos fragmentados debido a deformación térmica, y se deposita "escoria" en el reverso. Por contraste, cuando la potencia se fija a un valor bajo, no se produce evaporación. En potencias intermedias, la fragmentación se produce debido a un fenómeno de rotura. Aunque esto evita la formación de "escoria" a partir del efecto de evaporación, siguen formándose micro-grietas en la superficie, el reverso, y los planos fragmentados. Su solución es enfocar el haz de CO₂ de onda continua sobre la superficie de los sustratos, y ajustar cuidadosamente la velocidad a la que se hace pasar el haz de láser a través de la superficie de sustrato, el flujo de gas, y la potencia del láser de manera que una grieta se propague en la dirección deseada. El gas de ayuda puede incluir nitrógeno, argón, aire u oxígeno, o una mezcla de dichos gases. Se dan a conocer presiones del gas en el rango de 0,5 kg/cm² hasta 10kg/cm². Se dan a conocer ejemplos de sustratos de alúmina, sustratos de vidrio libres de álcali, y sustratos de vidrio de borosilicatos.

35 La patente de EE. UU. número 6 376 797 de Piwczyk, da a conocer un método de corte de semiconductores utilizando un láser de pulsos cortos (que tiene una anchura de pulso en el rango de decenas de nanosegundos o menor) en un vacío o en un entorno gaseoso que consiste sustancialmente en uno o varios de los gases siguientes: gas de formación (tal como hidrógeno) y gases nobles. Piwczyk demuestra velocidades de corte y factores de penetración incrementados. Muestra que cuando se utiliza un láser para cortar silicio o cualquier otro material en aire, el láser debe manejarse para proporcionar una densidad de potencia máxima en el foco del haz, que sea menor que la que provoca que el aire se descomponga y forme un plasma. Esto se debe a que la formación de un plasma consume sustancialmente la totalidad o la mayor parte de la energía del láser, evitando por lo tanto el corte por láser puesto que muy poca energía alcanza el material a cortar. Asimismo, observa que siempre se forma un plasma bajo estas condiciones experimentales. Postula que esto puede deberse a un inicio retardado del plasma en el vacío y en gases inertes, en comparación con otros ambientes. Dicha explicación sería consistente con estudios de propagación del plasma tales como los presentados por C. V. Bindhu y otros en Journal of Applied Physics, volumen 94, número 12, en las páginas 7402 a 7407. Bindhu y otros muestran que tarda varias decenas de nanosegundos en formarse una chispa en argón iniciada por láser, a 1 atmósfera. Piwczyk observa asimismo que el silicio volatilizado parece conducir a la formación de plasma, tal como se ve mediante un destello azul brillante cerca de la superficie del material.

50 Un problema con los enfoques anteriores es que el caudal de producción en un proceso de fabricación es relativamente lento, y por lo tanto los fabricantes de dispositivos semiconductores se han resistido a dejar de utilizar sierras de diamantes para cortar obleas de silicio.

Un objetivo de la presente invención es dar a conocer un proceso para el corte por láser de un material no metálico, que reduce el problema mencionado anteriormente. De acuerdo con la invención, se da a conocer el proceso de la reivindicación 1.

5 Por un "material no metálico", se entiende un material que no es un metal eléctricamente conductor. Normalmente, los metales eléctricamente conductores se cortan utilizando un proceso de corte con plasma, en el cual la energía procedente de una fuente de potencia eléctrica es transferida a través del plasma al material que se está cortando. El plasma es un gas eléctricamente conductor que es producido por un circuito iniciador del arco eléctrico, que habitualmente produce una tensión en corriente alterna de 5000 a 10 000 V, a 2 MHz. Una vez que el gas es ionizado, el plasma es excitado y mantenido por un suministro de energía eléctrica en el rango de 240 a 400 V de corriente continua. En el proceso que se describe en el presente documento, el material que se está cortando no es un metal eléctricamente conductor, y se considera que el plasma está siendo generado, excitado y mantenido por el láser. Los materiales no metálicos, tal como se definen en el presente documento, incluyen metaloides tales como silicio y germanio semiconductores. Los materiales no metálicos comprenden asimismo materiales tales como obleas semiconductoras que contienen pistas de metalización sobre su superficie.

15 Tal como se verá a continuación, los resultados que pueden obtenerse con la invención son muy sorprendentes. La incisión ultra-suave junto con las velocidades de corte incrementadas de más de 8 m/min son completamente inesperadas. Éstas deben ser comparadas con las de aproximadamente 1 a 3 m/min mediante los métodos de la técnica anterior, que incluyen aserrado con diamantes y procesamiento láser. Se ha descubierto un nuevo régimen de procesamiento que se cree tendrá importantes implicaciones comerciales para un amplio rango de industrias. Además, es sorprendente que un láser CW trabajando en torno a 1 μm pueda cortar sin inducir agrietamiento y oxidación superficial significativos. Los sistemas de la técnica anterior utilizan láseres de impulsos o utilizan láseres de frecuencia triplicada o duplicada que funcionan aproximadamente a 355 nm y 532 nm, frecuentemente con una técnica de múltiples pases (aplicable solamente a silicio de menos de unos 0,2 mm de grosor) para acceder a la absorción incrementada de silicio a estas longitudes de onda. Por lo tanto, puede verse que el proceso inventivo funciona sobre un mecanismo completamente diferente y proporciona un rendimiento tremendamente mejorado.

Sorprendentemente, ajustando la distancia de seguridad se ha descubierto que el material no metálico puede ser maquinado a velocidades de proceso muy superiores a las conseguidas utilizando un proceso convencional de corte por láser. Más sorprendentemente, no pudieron observarse daños térmicos en la cara superior ni en la cara inferior del material no metálico. Se consiguieron velocidades de corte de unos 3 m/min con una oblea con un grosor de 0,68 mm. La distancia de seguridad fue de unas 50 μm . La optimización subsiguiente ha incrementado la velocidad de corte hasta 6 m/min para un grosor de la oblea de 0,69 mm, y a 8,5 m/min para obleas más delgadas, velocidad de corte que está limitada por la velocidad de la mesa de corte y no por el propio proceso.

35 Éste es un resultado sorprendente puesto que hasta la fecha se consideraba que dichas velocidades de corte elevadas eran imposibles en silicio utilizando láseres de onda continua con una longitud de onda en el infrarrojo cercano, sin inducir excesivos daños térmicos. Esto se debe a que una oblea de silicio absorbe solamente un porcentaje pequeño de la radiación láser a longitudes de onda de aproximadamente 1 μm .

Por lo menos uno entre la intensidad del haz de láser, la presión del gas en la corriente de gas, la distancia de seguridad, y la posición del foco pueden ajustarse para provocar el incremento en la temperatura del chorro de plasma.

40 La temperatura del chorro de plasma puede ser mayor de 2000 °C.

La posición del foco puede seleccionarse de manera que el chorro de plasma esté contenido sustancialmente por debajo de la superficie del material. La posición del foco puede estar entre unas 100 μm y 250 μm por debajo de la superficie del material. La posición del foco puede seleccionarse de manera que la aspereza media es menor de 2 μm Ra. Por lo menos una entre la posición del foco y la velocidad de corte puede ser ajustadas para incrementar la cohesividad de la eyección. La velocidad de corte puede ser ajustada de manera que la eyección emerja en un ángulo sustancialmente igual a 30 grados respecto de la normal a la superficie del material. La posición del foco puede seleccionarse para definir la incisión mediante paredes laterales sustancialmente paralelas. La posición del foco puede seleccionarse para proporcionar una velocidad de corte de, por lo menos, 1 m/min. La posición del foco puede seleccionarse para proporcionar una velocidad de corte de, por lo menos, 5 m/min. La posición del foco puede seleccionarse para proporcionar una velocidad de corte de, por lo menos, 8 m/min.

El proceso puede comprender la etapa de proporcionar un medio de monitorización del enfoque.

El proceso puede comprender la etapa de proporcionar un medio de monitorización de la eyección.

El gas puede comprender un gas inerte. El gas puede comprender un gas noble. El gas noble puede ser argón.

La presión del gas puede ser mayor de 100 psi (689 KPa) y menor de 500 psi (3447 KPa). La presión del gas puede estar entre aproximadamente 150 psi (1034 KPa) y 300 psi (2068 KPa).

El orificio de salida puede tener un diámetro de salida de entre 100 μm y 1 mm. El diámetro de salida puede ser de unas 500 μm .

- 5 La distancia de seguridad puede ser menor de 250 μm . La distancia de seguridad puede ser menor de 200 μm . La distancia de seguridad puede estar aproximadamente entre 50 μm y 100 μm .

La cintura del haz puede tener un diámetro menor de 20 μm . El diámetro puede ser menor de 10 μm . El diámetro puede ser menor de 7 μm .

- 10 La intensidad óptica en la cintura del haz puede ser mayor de 70 MW/cm^2 . La intensidad óptica puede ser mayor de 200 MW/cm^2 . La intensidad óptica puede ser mayor de 390 MW/cm^2 .

El láser puede definirse por un M^2 entre 1 y 4, donde M^2 es el factor de propagación del haz tal como se define mediante el estándar ISO 11 146. El M^2 puede ser menor de 2. El M^2 puede ser menor de 1,5. Un haz de láser gaussiano perfecto tiene un M^2 de 1, y cuanto mayor es el M^2 del haz de láser mayor es el diámetro de un punto enfocado (la cintura 41 del haz) para una divergencia dada del haz de entrada.

- 15 La longitud de onda de la radiación láser puede estar en el rango de 800 nm a 2500 nm. El rango puede estar entre 1030 nm y 1150 nm. El rango puede ser de 1060 nm a 1090 nm.

El láser puede tener una potencia media sobre la superficie del material, mayor de 20 W. La potencia media puede ser mayor de 37,5 W. La potencia media puede estar entre 100 W y 1 kW. La potencia media puede estar entre 100 W y 500 W.

- 20 El láser es un láser de onda continua.

El láser puede ser un láser de fibra que comprende, por lo menos, un dopante de tierras raras. El dopante de tierras raras puede comprender iterbio.

El material puede tener una lisura superficial en una zona a maquinarse, menor que la distancia de seguridad. La lisura superficial puede ser menor de 10 μm .

- 25 El material puede comprender, por lo menos, uno entre un semiconductor, un cristal, un vidrio o una cerámica. Por "cristal" se entiende un cristal diferente de un semiconductor. Tal como se utiliza en el presente documento, se entiende que el término "cerámica" no comprende un semiconductor o un cristal. Análogamente, tal como se utiliza en el presente documento se entiende que el término "cristal" no incluye un semiconductor. El semiconductor puede ser silicio. La cerámica puede ser alúmina. El cristal puede ser zafiro.

- 30 El gas puede comprender un gas reactivo que puede reaccionar con el material.

A continuación se describirán realizaciones de la invención solamente a modo de ejemplo y haciendo referencia a los dibujos anexos, en los cuales:

la figura 1 muestra un aparato de corte por láser para cortar un material no metálico, de acuerdo con el proceso de la presente invención;

- 35 la figura 2 muestra un aparato de corte por láser visto en ángulo recto respecto de la dirección de corte, para mostrar el ángulo de salida de la eyección 25;

la figura 3 muestra una vista superior de una incisión cortada en un material;

la figura 4 muestra un aparato para el corte por láser del material, en el que el láser está enfocado en el interior del material;

- 40 la figura 5 muestra una sección transversal de la incisión cortada en un material;

las figuras 6 y 7 muestran resultados calculados de la variación del diámetro del haz con la distancia desde el foco del haz, para haces de láser con $M^2 = 1,1$; y

las figuras 8 y 9 muestran resultados calculados de la variación del diámetro del haz con la distancia desde el foco del haz, para haces de láser con $M^2 = 1,5$.

5 Haciendo referencia a la figura 1, se muestra un aparato 19 de corte por láser para cortar un material no metálico 1, comprendiendo el aparato 19 un láser 2, una boquilla 4 de gas y un orificio de salida 6 contenido en la boquilla 4 de gas. En funcionamiento, el orificio de salida 6 está situado cierta una distancia de seguridad 15 respecto de una superficie 7 del material 1. El gas 5 es canalizado a través del orificio de salida 6 para formar una corriente 47 de gas. El láser 2 es excitado para crear un haz de láser 3. El haz de láser 3 es enfocado a través del orificio de salida 6 para formar una cintura 41 del haz en una posición 48 del foco en la superficie 7 del material 1, o cerca de la misma.

10 El láser 2 puede ser utilizado para producir un chorro de plasma 9 en la corriente 47 de gas. A continuación, puede utilizarse el láser 2 para calentar el chorro de plasma 9 con objeto de provocar que la temperatura del chorro de plasma 9 se incremente lo suficiente para cortar el material 1 con objeto de producir una incisión 31 que tiene una zona superior 58 con un aspereza media menor de $5 \mu\text{m Ra}$. La incisión 31 y la zona superior 58 se muestran haciendo referencia a las figuras 3 y 5 respectivamente, y la cintura 41 del haz y la posición 48 del foco se muestran haciendo referencia a la figura 4.

15 Por un "material no metálico", se entiende un material que no es un metal eléctricamente conductor. Normalmente, los metales eléctricamente conductores se cortan utilizando un proceso de corte con plasma, en el cual la energía procedente de una fuente de potencia eléctrica es transferida a través del plasma al material que se está cortando. El plasma es un gas eléctricamente conductor que es producido por un circuito iniciador del arco eléctrico, que habitualmente produce una tensión en corriente alterna de 5000 a 10 000 V, a 2 MHz. Una vez que el gas es ionizado, el plasma es excitado y mantenido por un suministro de energía eléctrica en el rango de 240 a 400 V de corriente continua. En el proceso que se describe en el presente documento, el material que se está cortando no es un metal eléctricamente conductor, y se considera que el plasma 9 está siendo generado, excitado y mantenido por el láser 2. Los materiales no metálicos tal como se definen en el presente documento incluyen metaloides tales como los semiconductores silicio y germanio.

25 En una realización preferida, el láser 2 es un láser de fibra de onda continua dopado con iterbio, fabricado por SPI Lasers UK Limited (modelo número SP200C-001) que emite entre 10 W y 200 W de radiación láser aproximadamente a 1090 nm en modo único. El láser 2 emite el haz de láser 3 a través de un cable 11 de fibra óptica, y de óptica de colimación 12. Se dispone un expansor opcional 13 del haz, para ajustar el diámetro de la cintura 41 del haz, un diámetro mayor del haz de láser 3 proporcionando un diámetro menor de la cintura 41 del haz. Sin el expansor 13 del haz, el diámetro del haz de láser 3 emitido desde la óptica 12 de colimación es de aproximadamente 5,5 mm. Con un expansor del haz X2, el diámetro del haz de láser es de 11 mm. El haz de láser es introducido en la boquilla 4 de gas mediante un reflector 14. Se dispone óptica 8 de enfoque, para enfocar el haz de láser 3 a través de la boquilla 4 de gas, sobre la superficie 7 del material 1. Se dispone un cubreobjeto 10 para proteger la óptica de enfoque 8 del polvo o de los residuos.

35 En un experimento inicial, el material 1 fue una oblea de silicio. Como óptica de enfoque 8, se utilizó una lente de longitud focal de 50 mm. Se calculó el diámetro de la cintura 41 del haz siendo de aproximadamente $15 \mu\text{m}$ a $20 \mu\text{m}$. El gas 5 fue argón con una presión de unos 200 psi (1379 KPa). La boquilla 4 de gas fue una boquilla de gas disponible comercialmente, con un diámetro eficaz 46 de salida (mostrado haciendo referencia a la figura 4) de 0,5 mm. Sin el material 1 en su posición, la boquilla 4 de gas emitió el gas 5 en una corriente de gas con un diámetro de unos 0,5 mm.

45 Sorprendentemente, ajustando la distancia de seguridad 15 se descubrió que el silicio puede ser maquinado a velocidades de proceso mucho mayores que las conseguidas utilizando un proceso convencional de corte por láser. Más sorprendentemente, no pudieron ser observados daños térmicos en la cara superior ni en la cara inferior de la oblea de silicio. Se consiguieron velocidades de corte de unos 3 m/min con una oblea de silicio con un grosor de 0,68 mm. La distancia de seguridad 15 fue de unas 50 μm . La optimización posterior ha incrementado la velocidad de corte a 6 m/min para una oblea de silicio de 0,68 mm de grosor, y a 8,5 m/min para obleas más finas, velocidad de corte que está limitada por la velocidad de la mesa de corte (no mostrada) y no por el propio proceso.

50 Éste es un resultado sorprendente puesto que hasta la fecha se consideraba que dichas velocidades de corte elevadas eran imposibles en silicio utilizando láseres de onda continua con una longitud de onda en el infrarrojo cercano, sin inducir excesivos daños térmicos. Esto se debe a que una oblea de silicio absorbe solamente un porcentaje pequeño de la radiación láser a longitudes de onda de aproximadamente $1 \mu\text{m}$.

55 Experimentos posteriores demostraron que el proceso anterior funciona también con obleas de silicio procesadas, tal como las utilizadas en la industria de los semiconductores. Se considera que los resultados son muy significativos comercialmente para procesos de fabricación final en los que las obleas procesadas son fragmentadas antes de la unión con cables y del empaquetado como circuitos integrados.

Pueden utilizarse materiales no metálicos distintos del silicio, por ejemplo, el material 1 puede ser alúmina o nitruro de silicio. De nuevo, esto es sorprendente porque estos materiales se cortan convencionalmente utilizando láseres CO₂ de baja potencia debido a la absorción mejorada de este material a la larga longitud de onda del infrarrojo lejano de 10,6 μm, de estos láseres. Ensayos previos de laboratorio habían mostrado que el silicio, la alúmina y el nitruro de silicio podrían maquinarse con láseres de fibra emitiendo en el infrarrojo cercano pero, a la longitud de onda de emisión de estos láseres, la absorción del haz por el material fue desigual y por lo tanto el corte fue impredecible. Para conseguir un corte mejorado, fue necesario gas de ayuda de oxígeno distribuido coaxialmente y esto condujo a una entrada de calor excesiva en la pieza y a una fusión excesiva del material.

A continuación haciendo referencia a la figura 2, se muestra el aparato 19 de la figura 1, con el material metálico 1 siendo desplazado de derecha a izquierda, y el material fundido, la eyección 25, siendo expulsada desde debajo del material 1. La eyección 25 se muestra saliendo del material 1 en un ángulo θ 21 respecto de la vertical. Haciendo referencia a los ejemplos, se mostrará que es posible mejorar el control del proceso monitorizando el ángulo θ 21.

La figura 3 muestra una superficie superior de una incisión 31 que ha sido cortada en el material 1. La incisión 31 tiene una anchura 32 de la incisión. La incisión 31 puede ser una muesca cortada a través del material 1, o puede ser una ranura cortada en el material 1. La figura 5 muestra una sección transversal de la incisión 31. La incisión 31 tiene una anchura 32 de la incisión en su superficie superior 44 y una anchura 52 de la incisión en su superficie inferior 45. En general, la anchura 32 es diferente de la anchura 52.

Sorprendentemente, se ha visto que es posible optimizar el proceso de corte de manera que las paredes laterales 53, 54 sean sustancialmente paralelas. Las paredes laterales 53, 54 tienen una zona superior 58 y una zona inferior 59. El proceso que se está describiendo aquí, produce superficies sorprendentemente suaves en la zona superior 58. Asimismo, se muestra la escoria 57 adherida a la superficie inferior 45. La escoria 57 es muy indeseable y puede provocar el agrietamiento del material 1.

La figura 4 muestra una vista más detallada del aparato de la figura 1 con la inclusión del medio de enfoque 49, el medio 55 de monitorización del foco y el medio 56 de monitorización de la eyección. Por conveniencia, se muestra la incisión 31 teniendo una anchura constante 32. El medio de enfoque 49 permite que la posición de la cintura 41 del haz se varíe independientemente de la distancia de seguridad 15. La posición de la cintura 41 del haz se muestra estando en una posición 48 del foco medida con respecto a una superficie superior 44 del material 1. Un valor negativo para la posición 48 del foco indicaría que la cintura 41 de la haz está por encima de la superficie 44, mientras que un valor positivo indicaría que la cintura 41 del haz está por debajo de la superficie 44. El medio 49 de enfoque puede ser un dispositivo de ajuste mecánico tal como un anillo de enfoque. El medio 55 de monitorización del foco permite que la posición de la cintura 41 del haz se referencie a la superficie superior 44 del material 1. Esto puede conseguirse antes de iniciar el proceso de corte, enfocando sobre la superficie superior 44 para establecer un dato de referencia. Cuando se consigue el enfoque apropiado, la radiación láser será reflejada, y la radiación reflejada puede ser observada con el medio 55 de monitorización del foco, mediante un espejo reflectante parcialmente. El espejo parcialmente reflectante puede ser el reflector 44 que puede ser parcialmente transmisor. El medio 55 de monitorización del foco puede ser una cámara de video. Alternativamente, el medio 55 de monitorización del foco puede ser una tarjeta detectora de infrarrojos. Una vez conocido el dato de referencia, el foco puede ser ajustado a la posición deseada 48 del foco con el medio de enfoque 49. El medio 56 de monitorización de la eyección puede ser una cámara de video, o una abertura de observación para examinar el proceso. El medio 56 de monitorización de la eyección puede monitorizar el ángulo θ 21 emitido por la eyección 25. Alternativa o adicionalmente, el medio 56 de monitorización de la eyección puede monitorizar la consistencia del chorro 9 de plasma. La información obtenida desde el medio 56 de monitorización de la eyección puede ser utilizada para controlar la velocidad de corte, la presión de gas, o la potencia emitida por el láser 2.

La figura 5 muestra la sección transversal de una típica incisión 31. La incisión 31 tiene una anchura 51 en su superficie superior 44, y una anchura 52 en su superficie inferior 45. En general, la anchura 51 es diferente de la anchura 52. Sorprendentemente, se encontró que es posible optimizar el proceso de corte de manera que las paredes laterales 53, 54 sean sustancialmente paralelas, con lo que las anchuras 51 y 52 de la incisión son sustancialmente iguales.

Se estudió el efecto de una serie de variables clave del proceso, utilizando los tipos de aparatos mostrados en las figuras 1, 2 y 5, a través de una serie de ensayos experimentales de una sola variable. Se realizaron incisiones en los materiales utilizando un número fijo de impulsos de láser múltiples y una potencia de láser fijada a 200 W. Las variables de proceso estudiadas fueron la distancia de seguridad 15 de la boquilla a la pieza de trabajo, el tipo de gas 5, y la presión del gas. A medida que estos ensayos progresaron quedó claro que el gas de ayuda coaxial inerte y la distancia reducida de separación 15 de la boquilla eran variables clave para producir un porcentaje incrementado de muescas de penetración completa. Un ajuste fino posterior del parámetro clave de la distancia de separación 15 de la boquilla utilizando gas de ayuda argón alta presión, 200 psi (1379 KPa), condujo a reducir más la distancia 15 de la boquilla a la pieza de trabajo hasta por debajo de 50 micras, y en este punto el 100% de los cortes fueron totalmente penetrados. En presiones inferiores a 175 psi (1206 KPa) se observó un acoplamiento inconsistente y una baja calidad de la incisión. No solamente el proceso se mostró visualmente muy diferente de los

procesos de corte de la técnica anterior, sino que no se observaron residuos sobre la superficie superior o inferior 44, 45 del material 1 cortado por láser.

5 La distancia de seguridad 15 es significativamente menor a la utilizada normalmente. En el corte por láser de la técnica anterior, se utilizan 200 micras y más para cortar micro-metales debido a las superficies metálicas no lisas y a los subsiguientes problemas de bloqueo. En el presente caso, la superficie muy lisa permitió mantener distancias mucho más cortas. Por lo tanto, se han realizado dos cambios muy significativos, la utilización de una distancia de seguridad más corta 15 de la boquilla a la pieza de trabajo, y un gas de ayuda inerte. Asimismo, se observó que se produjeron incisiones mucho más limpias, adhiriéndose al sustrato menos material de capas refundidas.

10 Es bien sabido que la absorción de silicio a una longitud de onda de 1090 nm es baja, y por lo tanto los láseres de 1 micra no se consideran ideales para cortar silicio. Sin embargo, sorprendentemente, a una potencia de láser de onda continua (CW, continuous wave) de 200 W, pronto resultó evidente que había muchas ventajas significativas para utilizar láseres de fibra para este proceso: previamente, había sido imposible cortar a través de un material de oblea de silicio en todo su grosor, sin provocar daños térmicos graves. Actualmente no sólo se ha hecho posible cortar un grosor mucho mayor de silicio de lo que previamente había sido posible con esta potencia media, sino que son posibles velocidades de corte muy superiores; se consiguieron por encima de 8 m/min con 200 W CW. Además, el corte de silicio policristalino más fino puede realizarse a muy alta velocidad y puede cortarse, asimismo, a una potencia media sensiblemente reducida.

15 Experimentación adicional mostró que fue necesaria solamente una CW de 50 W para cortar silicio de 0,4 mm de grosor. Una reducción adicional en la potencia media condujo a un umbral identificado claramente en 37,5 W; resultando intermitente el corte por láser a este nivel de potencia y deteniéndose el corte.

20 Actualmente se cree que el material está siendo cortado por un chorro 9 de plasma que se forma en la corriente 47 de gas. Se considera que la corriente 47 de gas está en un factor 2, o dentro de éste, respecto de las velocidades supersónicas. Esto es consistente con nuestra observación de que a presiones mayores, la boquilla 4 de gas se bloquea, es decir, incrementar la presión del gas tiene poco efecto sobre el flujo de gas o las velocidades de corte. 25 Por lo tanto, la corriente 47 de gas propagará el plasma 9 a través de la incisión 31 en, o dentro de, un factor 2 respecto de las velocidades supersónicas. La iniciación del chorro 9 de plasma puede producirse por la intensidad de la luz en el interior de la cintura 41 del haz, del haz de láser enfocado 3. Alternativa o adicionalmente, la iniciación del chorro 9 de plasma puede estar ayudada por partículas volatilizadas del material 1, tal como se muestra en la patente de EE. UU. número 6 376 797, de Piwczyk. Una vez iniciado (o producido), la intensidad de la luz y la presión del gas pueden ser suficientes para que el plasma se propague hacia atrás a lo largo del haz de láser 3. 30 Puesto que el haz de láser 3 es un haz de láser de CW (a diferencia del láser de impulsos cortos dado a conocer por Piwczyk), el haz de láser 3 excita el plasma hasta que tiene energía suficiente para cortar el material 9. Por lo tanto, sorprendentemente, se crea un nuevo régimen para el corte por láser, que utiliza el láser 2 para producir (o generar) el chorro 9 de plasma, y utiliza el láser 2 para excitar el chorro 9 de plasma de manera que éste puede cortar el material. Estas observaciones están soportadas por los estudios de propagación del Bindhu y otros (aludidos previamente en el presente documento) que muestran que los plasmas perduran durante, por lo menos, 400 ns a la presión atmosférica. Se cree que el plasma perduraría mucho más a las presiones que se utilizan en esta invención. Estas observaciones están, asimismo, soportadas por nuestra observación de que el proceso de corte depende críticamente de la presión del gas, y de la distancia de seguridad 15 entre la boquilla 4 y el material 1 que está siendo cortado. 35 40

Incrementar la distancia de separación 15 reducirá la presión del gas 5 en la incisión 31, reduciendo por lo tanto la capacidad de que se forme un chorro 9 de plasma de alta energía.

45 En conformidad con las explicaciones de la patente de EE. UU. número 6 376 797, de Piwczyk, el chorro 9 de plasma atenuará severamente el haz de láser 3, y por lo tanto la mayor parte de la potencia contenida en el haz de láser 3 será absorbida por el chorro 9 de plasma y no alcanza el material 1 como radiación láser.

Se cree que se conseguirá una mejora adicional del proceso introduciendo hidrógeno, u otros gases de formación, reducción o reactivos (tales como haluros) en la corriente de gas o en torno a la misma, tal como se explica en la patente de EE. UU. número 6 376 797, de Piwczyk, en la solicitud de patente de EE. UU. número 2006/0 249 480, de Boyle y otros, y en la patente de EE. UU. número 5 653 896, de Couch y otros, patentes y solicitud de patente las cuales se incorporan como referencia al presente documento. 50

La experimentación sobre obleas de silicio ha mostrado los puntos siguientes:

- 1) Las obleas pobladas, es decir las obleas con muchas capas diferentes de recubrimientos, pueden cortarse a velocidades idénticas.

2) Las obleas con superficies muy pulidas y no pulidas pueden, asimismo, ser cortadas por láser a velocidades idénticas.

3) No se observó re-deposición de residuos en la superficie superior 44.

4) No se observó eyección 25 de partículas grandes durante el proceso de corte.

5) No se observaron residuos re-depositados sobre la superficie inferior 45.

6) La refundición sobre la superficie superior 44 pareció ser mínima.

Los puntos 5 y 6 combinados con las velocidades elevadas de corte por láser y la consiguiente baja entrada de calor por unidad de longitud, sugieren que el agrietamiento del silicio puede ser escaso. Es necesario confirmar esto mediante análisis posteriores.

10 A continuación se hará referencia a una serie de ejemplos para ejemplificar mejor realizaciones preferidas de la invención. Los ejemplos se proporcionan solamente con propósitos ilustrativos, y no deben interpretarse como limitativos de la invención en modo alguno.

15 En los ejemplos siguientes, el láser 2 utilizado fue un láser de 200 W de fibra de onda continua refrigerado por agua, fabricado por SPI Lasers UK Limited, modelo número SP200C-001. El haz de láser 3 pudo ser modulado. La boquilla 4 de láser se compuso de un cabezal de maquinado por láser disponible comercialmente, obtenido en Laser Mechanisms Finekerf™, sobre el cual se montó una boquilla de gas de 0,5 mm. La óptica de enfoque ocho se compuso de una lente triple Optosigma de 50 mm. Se utilizaron expansores 13 del haz de X2, X2,8 y X3,7 disponibles comercialmente, para ajustar el diámetro de la cintura 41 del haz. El gas 5 del proceso fue argón. Se utilizó un sistema de movimiento industrial convencional (no mostrado en los dibujos) para desplazar el material 1 con respecto al haz de láser 3.

20 Se utilizaron cuatro grosores de obleas de silicio monocristalino, grosores de 0,2, 0,4, 0,5 y 0,68 mm. Se utilizó un rango de presiones de gas de 50 a 300 psi (de 744 a 2068 KPa). Se utilizaron potencias medias de 100 a 200 W de onda continua. Se realizaron cortes en línea recta de 20 mm de longitud, separados 3 o 5 mm sobre las obleas. Éstos fueron cortados perforando la obleas de silicio con el láser 2, con un retardo de perforación de 30 a 40 μ s, antes de acelerar la mesa de movimiento sobre la cual fue acoplada la oblea de silicio. Asimismo, también sería posible cortar desde el borde de las obleas. Cuando fue posible, se cambió la velocidad de corte de 100 mm/min hasta un máximo de 8500 mm/min. La velocidad se modificó a incrementos apropiados para encontrar la velocidad de corte máxima a la cual la incisión 31 estaba penetrando por completo el material 1. La observación del material fundido saliendo de la parte de abajo de la incisión 31, la eyección 25, muestra claramente cuando la velocidad de corte se aproxima al máximo.

35 Se considera que el agrietamiento en la parte inferior de la incisión 31 es el obstáculo más difícil de superar. Las observaciones sobre las superficies agrietadas han mostrado que el agrietamiento está relacionado con la cantidad de escoria 57 adherida al lado inferior de la incisión 31. Por lo tanto, la calidad del corte fue evaluada observando la aspereza superficial, el carácter paralelo de la incisión 31, y la cantidad de escoria 57 adherida al lado inferior de la incisión 31. En un aparato optimizado, sería posible insertar medios 56 de monitorización del plasma para vigilar la escoria 57 y para proporcionar una señal con objeto de proporcionar señales de control para optimizar la velocidad de corte y la calidad del corte.

EJEMPLO 1

40 Los ensayos iniciales utilizando una CW a 200W, de argón a 200 psi (1379 KPa) con expansión del haz de X2, y el material de silicio de 0,68 mm de grosor, se dirigieron a establecer la velocidad de corte máxima eficaz. Se encontró que ésta fue de 5200 mm/min, puesto que proporcionó la mejor combinación de velocidad y calidad. Incrementar más la velocidad reduce la calidad por cuanto que se encontró que se adhiere escoria 57 a la superficie inferior 45. La mejor calidad de corte se encontró a una velocidad de corte máxima eficaz, aproximadamente del 10% al 20% menor que la velocidad de corte máxima a la cual se consiguieron incisiones con penetración total a través del silicio.

A continuación, se realizaron ensayos a 150 W donde se encontró que la velocidad de corte máxima eficaz fue de 2800 mm/min. A 100 W, no fue posible la penetración con este grosor del material.

EJEMPLO 2

Los ensayos anteriores se repitieron a 200 W utilizando argón a 300, 100 y 50 psi (2068, 689 y 344 KPa).

A 300 psi (2068 KPa), no hubo mejora en la velocidad de corte y tampoco mejora perceptible en la calidad del corte. A 100 psi (689 KPa), la velocidad de corte máxima eficaz disminuyó a 3600 mm/min. A 50 psi (344 KPa) siguieron siendo posibles cortes a 2800 mm/min pero todos los cortes fueron de calidad considerablemente peor. A continuación se llevó a cabo un ensayo de confirmación a 150 W y a 200 W, a una presión de 300 psi (2068 KPa), y se confirmaron las mismas velocidades de corte máximas eficaces que con 200 psi (1379 KPa).

EJEMPLO 3

Con el cabezal de maquinado láser de Laser Mechanisms Finekerf™, es posible variar independientemente la distancia de seguridad 15 de la boquilla a la pieza de trabajo, y la posición 48 del foco. Por lo tanto se realizaron una serie de ensayos en los que se varió la distancia de seguridad 15 de la boquilla a la pieza de trabajo desde 25 µm, que es tan cerca de la superficie del silicio como es posible en la práctica, hasta 200 µm sobre la superficie. No se observó ninguna disminución en la velocidad o la calidad del corte hasta que la distancia de seguridad 15 de la pieza de trabajo a la boquilla se ajustó a 0,2 mm. En este punto, la velocidad de corte máxima eficaz disminuyó significativamente hasta 4000 mm/min a 200 W, y 2000 mm/min a 150 W. Cuando se incrementó la velocidad de corte más allá de este valor, la calidad del corte se degradó rápidamente como quedó claro mediante un incremento en la cantidad de escoria 57 y un incremento en la aspereza superficial.

Cambiando la posición 48 del foco para compensar el cambio en la distancia de seguridad 15 de la boquilla a la pieza de trabajo, se observó un efecto muy significativo de la posición 48 del foco sobre la calidad del corte.

EJEMPLO 4

La distancia de seguridad 15 de la boquilla a la pieza de trabajo se fijó en 100 µm, y se realizaron una serie de ensayos en los que se modificó la posición 48 del foco a incrementos de 25 µm, independientemente de la distancia de seguridad 15 de la boquilla a la pieza de trabajo. Cuando la posición 48 del foco se bajó hacia el material 1, se observó un cambio muy significativo en la calidad del corte. Se encontró que una posición 48 del foco de 150 a 200 µm dentro del material de 0,68 mm de grosor proporcionó una calidad de corte muy mejorada, aunque ésta varió con la potencia y la velocidad del corte.

Por lo tanto, fue desarrollada y utiliza una técnica a partir de esto. Esta técnica involucró una observación cuidadosa de la eyección 25 desde la parte inferior del corte. Cuando el ángulo de la corriente de la eyección 25 cambia desde casi normal a la muestra, a 30 grados respecto de la muestra, la velocidad de corte óptima (en términos de calidad de corte) está próxima. A continuación se utilizó un indicador adicional. Una eyección 25 de salpicadura intermitente amplia, indicó que la posición 48 del foco no estaba lo suficientemente profunda en el material 1. Un movimiento en sentido antihorario del anillo de ajuste en el cabezal de maquinado por láser de Laser Mechanisms Finekerf™, bajó el foco hacia el silicio y produjo un cambio en la naturaleza de la corriente 25 de eyección, a una corriente de color blanco más intenso y más cohesivo. Un descenso adicional de la posición 48 del foco proporcionó una corriente de la eyección 25 dividida de manera mucho más fina. El análisis de los resultados mostró que la eyección 25 de una corriente cohesiva proporcionó consistentemente resultados mucho mejores. El flujo 25 de la eyección puede ser monitorizado utilizando el medio 56 de monitorización de la eyección de la figura 4.

Ajustar la posición 48 del foco para proporcionar la corriente 47 de eyección máximamente cohesiva, después de cada cambio de velocidad, permitió encontrar la velocidad de corte máxima eficaz. Se consiguió una extracción limpia del silicio fundido. Utilizando esta técnica (en adelante denominada "proceso A"), se consiguió una velocidad de corte máxima eficaz de 6000 mm/min sobre el material de 0,68 mm de grosor utilizando 200 W, y se consiguió una velocidad de corte máxima eficaz de 3400 mm/min utilizando 150 W sobre el mismo grosor.

Aunque se requieren más estudios, parece que la posición óptima 48 del foco para cortar obleas de silicio de aproximadamente 0,68 µm de grosor con la mejor combinación de velocidad y calidad, está entre el 25 y el 50% del grosor del material, dependiendo de la velocidad y de la potencia que se estén utilizando.

Dada la importancia de conseguir la posición correcta 48 del foco, podría haberse añadido ventajosamente un medio 55 de monitorización del enfoque, al aparato que se ha descrito haciendo referencia a la figura 4.

EJEMPLO 5

A continuación, se utilizaron expansores de X1 (sin expansión del haz), X2,8 y X3,7 utilizando solamente 200 W, argón a 200 psi (1379 KPa) y el material más grueso de 0,68 mm. La posición 48 del foco se optimizó utilizando el proceso A (indicado en el ejemplo 4) y se encontró que era de aproximadamente 175 µm para cada caso. Obsérvese que la posición exacta 48 del foco fue difícil de determinar. Se cree que es de 175 µm, aunque puede haber estado en el rango aproximado de 125 µm a 225 µm (después de tener en cuenta el error experimental). Aunque la expansión del haz de X2,8 y X3,7 proporcionó velocidades de corte máximas eficaces sólo ligeramente

reducidas, la extrema sensibilidad de este proceso al ajuste de la posición 48 del foco con la distancia de seguridad 15 de la boquilla fija de 100 μm , significó que era difícil utilizar eficazmente expansiones del haz superiores.

5 La ausencia de expansión del haz (el caso X1 uno) proporcionó resultados muy interesantes. La velocidad de corte no se redujo sensiblemente. Sin embargo, claramente el mecanismo de corte cambió significativamente tal como se puso de manifiesto mediante la naturaleza diferente de la corriente 25 de eyección. No fue posible ajustar la posición 48 del foco para identificar la 'corriente de eyección 25 cohesiva' que proporcionaba resultados óptimos. Esta observación clave se confirmó mediante el examen de los bordes superiores de la superficie de corte (la zona superior 58) cuando se utilizó el expansor del haz X2. El análisis de las superficies de corte ha confirmado que utilizar el expansor del haz X2 produce una zona superior con bordes superiores sin grietas, muy suaves, y con aspereza media menor de 2 μm Ra, y a menudo por debajo de 1 μm Ra. Sin embargo, en el caso X1, la zona superior 58 fue ranurada, y el proceso de corte estaba claramente 'dominado por la estriación'. Asimismo, estaban presentes claramente grietas de hasta 20 μm de longitud, y la aspereza media fue mucho mayor de 5 μm Ra.

EJEMPLO 6

15 A continuación, se evaluaron diferentes grosores del material con el método anterior de optimización del foco (proceso A). Las velocidades de corte máximas eficaces fueron:

1 mm, 350mm/min, 200W

0,68mm, 6000mm/min, 200W

0,5 mm, 7000mm/min, 200W

0,4 mm, 8500 mm/min (máxima velocidad de la mesa) a 150W, 1000mm/min a 50W CW.

20 0,2 mm, 8500 mm/min a 100W

0,1 mm 8500 mm/min a 75W

Estos datos se obtuvieron utilizando el expansor del haz X2. El sistema de movimiento (no mostrado) limitó las velocidades de corte para grosores por debajo de 0,5 mm de grosor; serían posibles velocidades más rápidas con sistemas más rápidos de movimiento.

25 EJEMPLO 7

A continuación, el gas 5 de ayuda argón fue sustituido por nitrógeno. Se encontró que la calidad del proceso fue similar a la producida cuando no se utilizó expansión del haz. La superficie de corte se volvió a convertir en una superficie agrietada muy oxidada (azulada) sin ninguna de las características suaves obtenibles por la presente invención. Se cree que esto puede haberse debido a que se requieren densidades de energía superiores para producir y mantener un plasma en nitrógeno, en comparación con argón.

EJEMPLO 8

35 Con potencia óptica de 20 W, el expansor del haz X2, y utilizando argón como gas de ayuda 5, se descubrió que era posible cortar ranuras en la superficie de una oblea de silicio. La distancia de seguridad 15 fue de 125 μm , la presión del gas fue de 50 psi (344 KPa) y la posición 48 del foco estuvo aproximadamente 50 μm por debajo de la superficie superior 44. La ranura fue de 110 μm de anchura, muy limpia, casi sin fusión acumulada sobre la zona superior 58, posiblemente de 2 a 3 μm máximo, y la aspereza media fue menor de 2 μm Ra. La zona superior 58 característica es indicativa de que está funcionando un proceso igual o similar al de los ejemplos anteriores. La formación de ranuras en obleas semiconductoras (tal como obleas de silicio) es un proceso importante debido a que los dispositivos en el interior de la obleas semiconductoras pueden ser después separados entre sí, doblando la oblea.

40 La formación de ranuras en el material de polisilicio es importante asimismo para la fabricación de células fotovoltaicas (solares). Se cree que incrementando la potencia óptica hasta el rango de 100 W a 200 W, se obtendrían ranuras muy limpias a velocidades de corte superiores.

45 Haciendo referencia a los resultados descritos en los ejemplos anteriores, y haciendo referencia a la figura 5, cuando el proceso de corte está funcionando adecuadamente para producir una zona superior 58 suave, la aspereza media obtenible fue menor de 5 μm Ra. Con la optimización del proceso mediante las técnicas anteriores, y en concreto del proceso A discutido en el ejemplo 4, la aspereza media de la zona superior 58 se redujo a menos de 2 μm Ra. La aspereza media de la zona inferior 59 fue típicamente algo mayor, en el rango entre 2 μm y 5 μm Ra. Cuando el proceso no está funcionando adecuadamente, la aspereza media de la zona superior 58 fue de aproximadamente 10

µm a 15 µm Ra, siendo visible un borde ranurado (típico del maquinado por láser), y había a menudo un borde elevado de material re-depositado o fundido sobre la superficie superior 44. El ranurado indeseable y el borde elevado indeseable son típicos del maquinado láser convencional.

5 Las anchuras medias superior e inferior 32 y 52 de la incisión se midieron en las obleas procesadas en los ejemplos anteriores 4 a 7. En la tabla 1 se presentan datos representativos. Sorprendentemente, las paredes 53 y 54 de la incisión cuando se utiliza el expansor del haz X2 son sustancialmente paralelas, como lo son las paredes de la incisión para el expansor del haz X3,7 cuando se procesa el silicio de 0,68 mm de grosor. Dichos resultados son sorprendentes debido a que normalmente se habría esperado que el corte por láser, con un láser de 1 µm, produjera paredes de la incisión cónicas. Ésta es otra indicación de la novedad y utilidad del proceso de corte inventivo.

10 Tabla 1 que muestra el efecto de la expansión del haz sobre la anchura de la incisión

Grosor mm	Expansión del haz	Incisión superior 32 med. (µm)	Incisión inferior 52 med. (µm)
0,4	X2	50	45
0,68	X2	63	62
0,68	X1	105	40
0,68	X3,7	107	80
1,0	X1	250	70
1,0	X2	53	40
1,0	X3,7	195	50

15 A continuación haciendo referencia a la figura 6, se muestra la variación en el diámetro 62 del haz frente a la distancia 61 desde la cintura 41 del haz. Éstas fueron calculadas utilizando óptica de haz gaussiano asumiendo que $M^2 = 1,1$. Cuanto mayor es el diámetro del haz de entrada, del haz de láser 3, menores son los diámetros de la cintura 41 del haz. Las cuatro curvas 63, 64, 65 y 66 representan los diámetros del haz calculados para X1, X2, X2,8 y X3,7, respectivamente. La figura 7 muestra el diámetro 62 del haz sobre una larga distancia 61. Probablemente, estas curvas son las mejores que podrían conseguirse, y asumirían que no se produce degradación en la calidad del haz a través del aparato y el proceso de la presente invención.

20 Se muestran resultados similares en las figuras 8 y 9 con las curvas 81, 82, 83 y 84, que representan los diámetros del haz para X1, X2, X2,8 y X3,7 respectivamente, asumiendo $M^2 = 1,5$. Un M^2 de 1,5 tendría en cuenta la degradación en la calidad del haz a través del aparato y a través del gas 5 que fluye.

Comparando las figuras 6 y 8 y las figuras 7 y 9, se ve que la degradación en la calidad del haz (medida por el parámetro M^2) tiene un efecto despreciable sobre los diámetros del haz lejos del foco, en la cintura 41 del haz. Sin embargo, los diámetros del haz en el foco son mayores con $M^2 = 1,5$ que con $M^2 = 1,1$.

25 Una observación experimental fue que cuando se utilizó la expansión del haz X3,7 para cortar el material de 0,68 mm, fue necesario enfocar aproximadamente 50 µm más profundamente en el silicio cuando se incrementó la velocidad de corte, para minimizar la formación de escoria 57.

La zona superior 58 que tiene la superficie suave característica, tuvo una profundidad de aproximadamente 200 µm para cada grosor de material probado. Por lo tanto, para la oblea de silicio de 0,2 mm de grosor, la superficie suave característica cubre toda la profundidad del material.

30 Asimismo, se observó que para el material de 1 mm de grosor, fue necesario enfocar a una profundidad de 0,6 mm en el material para llevar a cabo la perforación inicial. Por lo tanto, para permitir el corte a una velocidad razonable fue necesario elevar la posición 48 del foco a 0,25 mm por debajo de la superficie. Se observó un efecto similar utilizando 150 W para cortar material de 0,68 mm de grosor. Esto puede indicar que el proceso de perforación puede ser diferente al proceso de corte optimizado, y muestra asimismo la importancia del método de optimización del foco (proceso A) mencionado anteriormente.

35 Los datos de incisión de la tabla 1 indicarían que la anchura superior 32 de la incisión es aproximadamente de 50 a 60 µm cuando se utiliza el expansor del haz X2. Haciendo referencia a las figuras 6 y 8, esto correspondería a una

5 distancia 61 desde el foco de aproximadamente 150 a 250 μm . Esto da soporte a la observación experimental de que la mejor calidad de corte se obtuvo cuando la posición focal 48 estuvo aproximadamente entre 150 y 250 μm dentro del material 1. Incrementar la posición focal 48 tendría el efecto de reducir la intensidad en la superficie del material 1. Reducir la posición focal 48 significaría que la intensidad óptica sobre la superficie del material puede ser suficiente para permitir que el chorro 9 de plasma se propague fuera del espacio confinado de la incisión 31. Esto tendría como resultado un chorro 9 de plasma escasamente confinado, y una condición de corte inestable. Experimentalmente, esto se observó primero como emisión de eyección 25 esporádica desde la incisión 31. Asimismo, como una anchura incrementada 32 de la incisión sobre la superficie superior 44, y por lo tanto como paredes 53, 54 menos paralelas. Los resultados X2 son claramente los óptimos en términos de paredes paralelas. Los resultados X3,7 muestran paredes casi paralelas para el material de 0,68 μm , pero paredes no paralelas para el material de 1 μm . Experimentalmente, se descubrió que es muy difícil configurar el aparato con la expansión del haz X3,7. Se piensa que esto se debe al incremento de 25 μm en el posicionamiento del foco obtenible desde el aparato. Un ajuste más fino debería permitir que el aparato sea configurado con el diámetro mayor del haz proporcionado por la expansión del haz de X3,7.

15 De forma interesante, el proceso no funcionó adecuadamente con el haz X1 (es decir, sin expansor del haz). Presumiblemente, esto se debe a que la intensidad óptica del haz de láser 3 cerca de la cintura 41 del haz es insuficiente para generar y mantener un chorro 9 de plasma estable, con la suficiente energía para procesar el silicio con la superficie suave característica obtenible con intensidades ópticas superiores. Las intensidades ópticas superiores se proporcionaron expandiendo el haz emitido por el colimador 12, utilizando los expansores del haz para proporcionar una cintura 41 del haz con un diámetro menor. Haciendo referencia a las figuras 8 y 9, esto implicaría que para una oblea de silicio de 0,4 mm de grosor, la intensidad óptica requerida en la cintura 41 del haz tiene que ser mayor de unos 70 MW/cm^2 para que el proceso funcione (correspondiente a un expansor del haz X2, los 50 W tal como se observa en el ejemplo 6 con el silicio de 0,4 mm de grosor, y asumiendo un $M^2 = 1,5$). El diámetro correspondiente de la cintura 41 del haz es de aproximadamente 9,5 μm . Para obleas más gruesas, se requiere una intensidad óptica superior, mayor de unos 200 MW/cm^2 (correspondiente al haz X2, 150 W tal como se observa en el ejemplo 1 con el silicio de 0,68 mm de grosor, y asumiendo un $M^2 = 1,5$). De nuevo, el diámetro correspondiente de la cintura 41 del haz es de aproximadamente 9,5 μm . Obsérvese que el láser de fibra utilizado tuvo un M^2 específico de 1,1. No obstante, se cree que existe cierta degradación en la calidad del haz a través de las lentes (óptica de enfoque 8) y a través del gas 5. Si se ha utilizado la cifra de M^2 de 1,1, correspondiente a los parámetros ópticos del haz previos al proceso, las anteriores intensidades ópticas críticas habrían sido aproximadamente $(1,5/1,1)^2$ mayores, lo cual es aproximadamente 1,8 veces mayor, es decir 130 MW/cm^2 para el silicio de 0,2 mm de grosor, y 390 MW/cm^2 para el silicio de 0,68 mm de grosor. El diámetro correspondiente de la cintura 41 del haz es de aproximadamente 7 μm . Preferentemente, para un funcionamiento fiable cortando silicio, las intensidades ópticas deberían ser del 10% al 50% mayores que estas cifras críticas.

35 Las figuras y los ejemplos anteriores indican que el proceso de la presente invención da a conocer un mecanismo de corte novedoso que proporciona cortes a muy alta velocidad (mayor de 5 m/milímetros) con una superficie superior (zona superior 58) de la incisión 31 característicamente suave y sin grietas. Refinando la técnica, es posible minimizar la escoria 57 que se adhiere a la parte inferior del corte, minimizando por lo tanto el agrietamiento. Aunque puede utilizarse una amplia gama de parámetros, un diámetro del haz de entrada de unos 11 mm (proporcionado por la expansión de las X2), una longitud focal de 50 mm y una presión del gas de aproximadamente 200 psi (1379 KPa), representaron el mejor compromiso práctico y se descubrió que proporcionan la ventana de procesamiento mayor.

45 El proceso de la presente invención proporciona una reproducción fiable en todos los grosores del material de silicio hasta más allá de 1 mm de grosor. Con sistemas de movimiento de mayor velocidad será posible el corte a mayor velocidad del silicio de grosor < 0,5 mm. Con mucho, la variable más importante del proceso es la de la posición 48 del foco en el material. Es necesario optimizar esto para el grosor de cada material, la potencia y la combinación de velocidad.

50 La presente invención permite la provisión de una incisión 31 que está caracterizada principalmente por la existencia de un borde superior super-suave (la zona superior 58) en la incisión 31 y la ausencia de ranurado en el interior de la zona superior 58. Con una optimización mayor, el proceso se caracteriza por una incisión 31 estrecha y casi paralela. La incisión 31 puede cortarse a través del material 1, o puede cortarse parcialmente a través del material 1 para formar una ranura.

55 Haciendo referencia a las figuras 1 a 5, puede considerarse que un aspecto de la invención es un proceso para cortar un material no metálico 1, proceso que comprende las etapas de: proporcionar un aparato 19 de corte por láser que comprende un láser 2, una boquilla 4 de gas, y un orificio 6 de salida en la boquilla 4 de gas; situar el orificio 6 de salida a una distancia de seguridad 15 desde la superficie 7 del material 1; hacer fluir el gas 5 a través del orificio 6 de salida para formar una corriente 47 de gas; excitar el láser 2 con objeto de crear un haz de láser 3; enfocar el haz de láser 3 a través del orificio 6 de salida para formar una cintura 41 del haz en una posición 48 del foco en la superficie 7 del material 1 o cerca de la misma; estando el proceso caracterizado por: utilizar el láser 2 para producir un chorro 9 de plasma en la corriente 47 de gas; y utilizar el láser 2 para calentar el chorro 9 de

plasma con objeto de provocar que la temperatura del chorro 9 de plasma se incremente lo suficiente para cortar el material 1 con una incisión 31 que tiene una zona superior 58 con una aspereza media menor de 5 $\mu\text{m Ra}$.

5 Por lo menos una entre la intensidad del láser, la presión del gas 5 en la corriente 47 de gas, la distancia de seguridad 15, y la posición 48 del foco, pueden ajustarse para provocar el incremento en la temperatura del chorro 9 de plasma.

La temperatura del chorro 9 de plasma puede ser mayor de 2000 $^{\circ}\text{C}$. La temperatura del chorro 9 de plasma puede ser mayor de 5000 $^{\circ}\text{C}$.

10 La posición 48 del foco puede seleccionarse de manera que el chorro 9 de plasma esté contenido sustancialmente por debajo de la superficie 7 del material 1. La posición 48 del foco puede estar entre unas 100 μm y 250 μm por debajo de la superficie 44 del material 1. La posición 48 del foco puede estar entre aproximadamente 150 μm y 200 μm por debajo de la superficie 7 del material 1. La posición del foco puede seleccionarse de manera que la aspereza media es menor de 2 $\mu\text{m Ra}$. Por lo menos una entre la posición 48 del foco y la velocidad de corte puede ajustarse para incrementar la cohesividad de la eyección 25. La velocidad de corte puede ajustarse de manera que la eyección 25 emerge en un ángulo 21 sustancialmente igual a 30 grados respecto de la normal a la superficie 7 del material 1. La posición 48 del foco puede seleccionarse para definir la incisión 31 mediante paredes laterales 53, 54 sustancialmente paralelas. La posición 48 del foco puede seleccionarse para proporcionar una velocidad de corte de, por lo menos, 1m/min. La posición 48 del foco puede seleccionarse para proporcionar una velocidad de corte de, por lo menos, 5 m/min. La posición 48 del foco puede seleccionarse para proporcionar una velocidad de corte de, por lo menos, 8 m/min.

20 El proceso puede comprender la etapa de proporcionar un medio 55 de monitorización del enfoque.

El proceso puede comprender la etapa de proporcionar un medio 56 de monitorización de la eyección.

El gas 5 puede comprender un gas inerte. El gas puede comprender un gas noble. El gas noble puede ser argón.

La presión del gas en el interior de la boquilla 4 puede ser mayor de 100 psi y menor de 500 psi. La presión del gas puede estar entre aproximadamente 150 psi (1034 KPa) y 300 psi (2068 KPa).

25 El orificio 6 de salida puede tener un diámetro de salida 46 de entre 100 μm y 1 mm. El diámetro de salida 46 puede ser de unas 500 μm .

La distancia de seguridad 15 puede ser menor de 250 μm . La distancia de seguridad 15 puede ser menor de 200 μm . La distancia de seguridad 15 puede estar entre unas 50 μm y 100 μm .

30 La cintura 41 del haz puede tener un diámetro menor de 20 μm . El diámetro puede ser menor de 10 μm . El diámetro puede ser menor de 7 μm .

La intensidad óptica en la cintura 41 del haz puede ser mayor de 70 MW/cm^2 . La intensidad óptica puede ser mayor de 200 MW/cm^2 . La intensidad óptica puede ser mayor de 390 MW/cm^2 .

El láser 2 puede estar definido por un M^2 entre 1 y 4. El M^2 puede ser menor de 2. El M^2 puede ser menor de 1,5.

35 La longitud de onda de la radiación láser 3 puede estar en el rango de 800 nm a 2500 nm. El rango puede estar entre 1030 nm y 1150 nm. El rango puede ser de 1060 nm a 1090 nm.

El láser 2 puede tener una potencia media sobre la superficie del material mayor de 20 W. La potencia media puede ser mayor de 37,5 W. La potencia media puede estar entre 100 W y 1 kW. La potencia media puede ser de entre 100 W y 500 W.

El láser 2 es un láser de onda continua.

40 El láser 2 puede ser un láser de fibra que comprende, por lo menos, un dopante de tierras raras (no mostrado). El dopante de tierras raras puede comprender iterbio.

El material 1 puede tener una lisura superficial en la zona a maquinar, menor que la distancia de seguridad 15. La lisura superficial puede ser menor de 10 μm .

El material 1 puede comprender, por lo menos, uno entre un semiconductor, un cristal no semiconductor, un vidrio, o una cerámica diferente de un semiconductor, de un cristal no semiconductor y de un vidrio. El semiconductor puede ser silicio. La cerámica puede ser alúmina. El cristal puede ser zafiro.

El gas 5 puede comprender un gas reactivo que puede reaccionar con el material.

- 5 Ejemplos de materiales no metálicos que pueden ser procesados de acuerdo con la presente invención incluyen semiconductores, cerámicas, cristal o combinaciones de semiconductores, cerámicas y cristales.

10 El semiconductor puede comprender: silicio, germanio; un semiconductor III-IV que comprende materiales tales como arseniuro de galio, fosfuro de indio, antimoniuro de indio; un semiconductor II-VI que comprende materiales tales como seleniuro de cadmio, sulfuro de cadmio, telururo de cadmio, un semiconductor cuaternario que comprende materiales tales como fosfoarseniuro de galio e indio; u otros semiconductores aleados que comprenden, por lo menos, uno entre silicio, germanio, galio, indio, fosfuro, aluminio o arseniuro. Preferentemente, la cerámica comprende alúmina. El cristal comprende preferentemente zafiro.

15 Tal como se ha indicado anteriormente, la invención se extiende asimismo a un dispositivo semiconductor, una célula de panel solar, una célula de combustible, un cabezal de impresión, un artículo ornamental, una pieza de joyería, o un juguete, cuando comprende el material no metálico cortado, producido por el proceso de la presente invención. El dispositivo semiconductor puede comprender un chip de silicio, por ejemplo tal como el utilizado en una consola de juegos. El dispositivo semiconductor puede estar fabricado de una oblea de silicio redimensionada, cortada o fragmentada. Las células de paneles solares pueden comprender material de polisilicio procesado utilizando la invención. Las células de combustible basadas en silicio requieren una fragmentación cuidadosa del silicio, para lo cual está invención sería adecuada idealmente. El cabezal impreso puede ser un cabezal de impresora de chorro de tinta, que comprende silicio o cerámica con pequeñas muescas cortadas utilizando la invención. Los artículos ornamentales pueden comprender materiales de cerámica o silicio. Pueden fabricarse joyas utilizando materiales de cerámica o silicio, que pueden comprender superficies coloreadas y brillantes. Los juguetes pueden comprender asimismo materiales de cerámica o silicio, que pueden comprender superficies coloreadas y brillantes. Todos estos artículos pueden fabricarse ventajosamente utilizando el proceso de la invención, junto con otros procesos tales como el empaquetamiento.

20

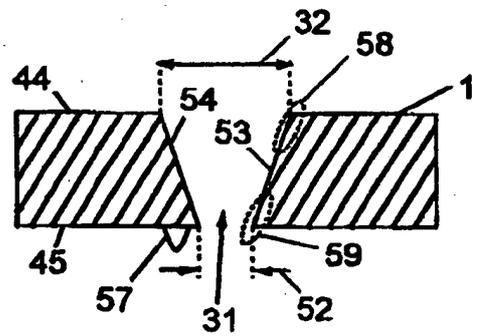
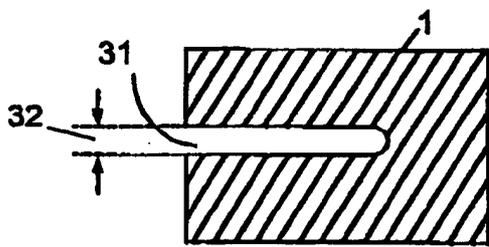
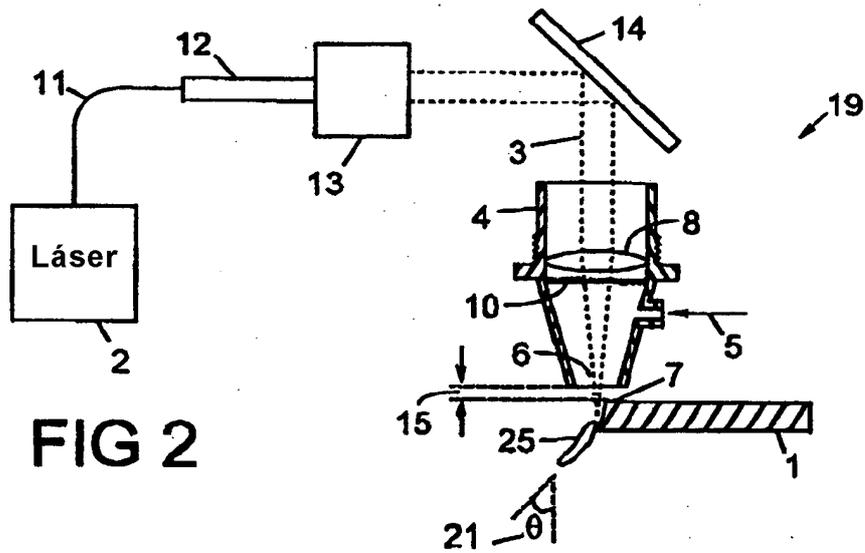
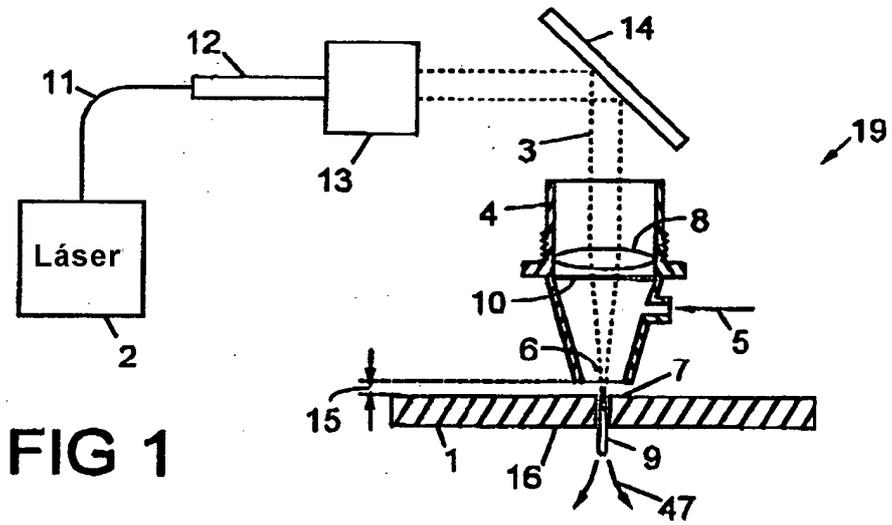
25

REIVINDICACIONES

1. Proceso para cortar un material no metálico (1), proceso que comprende las etapas de:
 - proporcionar un aparato de corte por láser que tiene un láser (2), una boquilla (4) de gas y un orificio de salida (6) en la boquilla (4) de gas;
- 5 situar el orificio de salida (6) a una distancia de seguridad (15) respecto de la superficie (7) del material (1);
 - hacer fluir el gas (5) a través del orificio de salida (6) para formar una corriente (47) de gas;
 - excitar el láser (2) para crear un haz de láser (3);
 - enfocar el haz de láser (3) a través del orificio de salida (6) para formar una cintura (41) del haz en una posición (48) del foco en la superficie (7) del material (1), o cerca de la misma;
- 10 estando el proceso caracterizado por:
 - el láser (2) es un láser de onda continua;
 - utilizar el láser (2) para producir un chorro (9) de plasma en la corriente (47) de gas; y
 - utilizar el láser (2) para calentar el chorro (9) de plasma con objeto de provocar que la temperatura del chorro (9) de plasma se incremente lo suficiente para cortar el material (1) con una incisión (31) que tiene una zona superior (58) con una aspereza media menor de 5 µm Ra.
- 15
2. Proceso acorde con la reivindicación 1, en el que se ajusta por lo menos una entre la intensidad del haz de láser (3), la presión del gas (5) en la corriente (47) de gas, la distancia de separación (15), y la posición (48) del foco, para provocar el incremento en la temperatura del chorro (9) de plasma.
3. Proceso acorde con la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en el que la temperatura del chorro (9) de plasma es mayor de 2000 °C.
- 20
4. Proceso acorde con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la posición (48) del foco se selecciona de manera que el chorro (9) de plasma se mantiene sustancialmente por debajo de la superficie (7) del material (1).
5. Proceso acorde con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la posición (48) del foco está entre aproximadamente 100 µm y 250 µm por debajo de la superficie (7) del material (1).
- 25
6. Proceso acorde con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la posición (48) del foco se selecciona de manera que la aspereza media es menor de 2 µm Ra.
7. Proceso acorde con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la posición (48) del foco se selecciona para definir la incisión mediante paredes laterales sustancialmente paralelas.
- 30
8. Proceso acorde con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la posición (48) del foco se selecciona para proporcionar una velocidad de corte de, por lo menos, 1m/min.
9. Proceso acorde con la reivindicación 8, en el que la posición (48) del foco se selecciona para proporcionar una velocidad de corte de, por lo menos, 5 m/min.
10. Proceso acorde con la reivindicación 9, en el que la posición (48) del foco se selecciona para proporcionar una velocidad de corte de, por lo menos, 8m/min.
- 35
11. Proceso acorde con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la presión del gas es mayor de 100 psi (689 KPa) y menor de 500 psi (3447 KPa).
12. Proceso acorde con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la distancia de seguridad (15) es menor de 250 µm.
- 40
13. Proceso acorde con la reivindicación 12, en el que la distancia de seguridad (15) es menor de 200 µm.

14. Proceso acorde con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la longitud de onda del haz de láser (3) está en el rango de 800 nm a 2500 nm.

15. Proceso acorde con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el material (1) comprende, por lo menos, uno entre un semiconductor, un cristal, un vidrio o una cerámica.



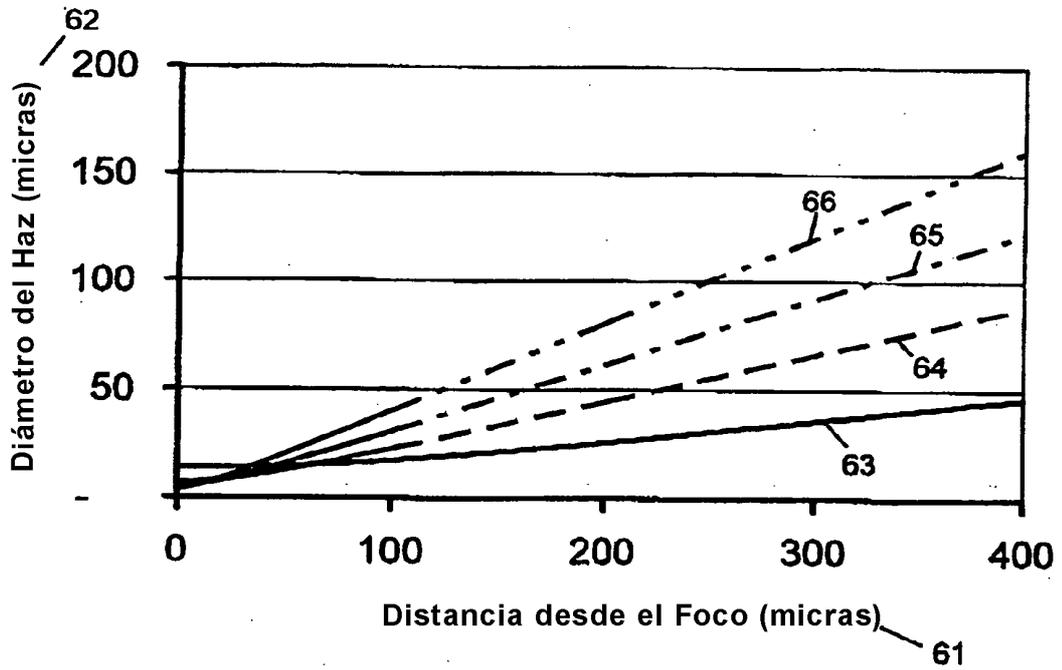


FIG 6

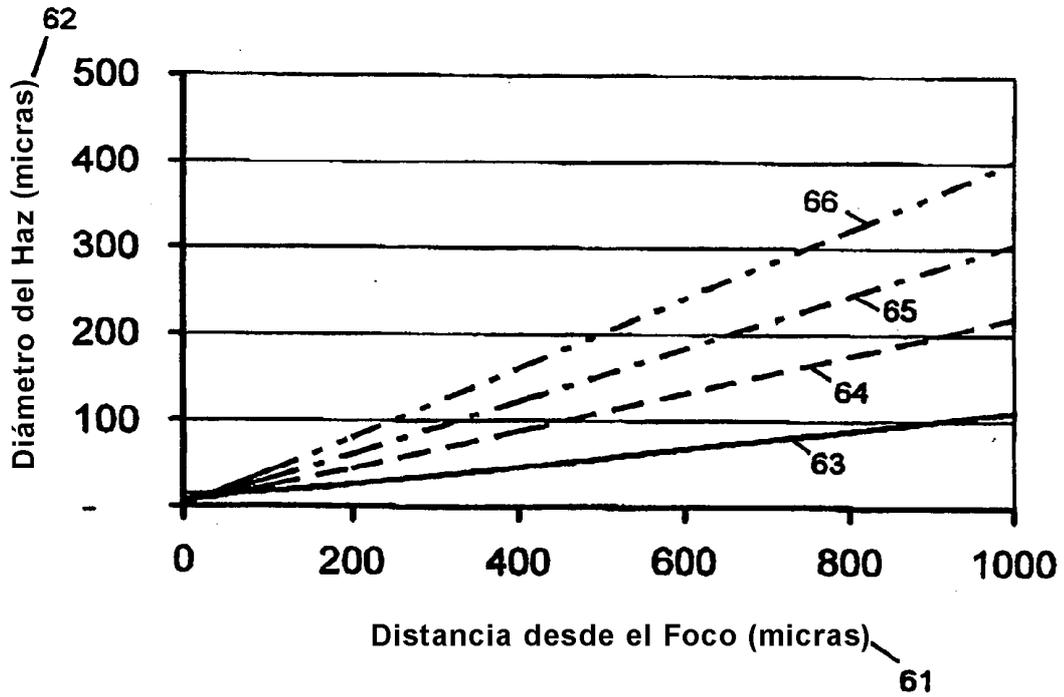


FIG 7

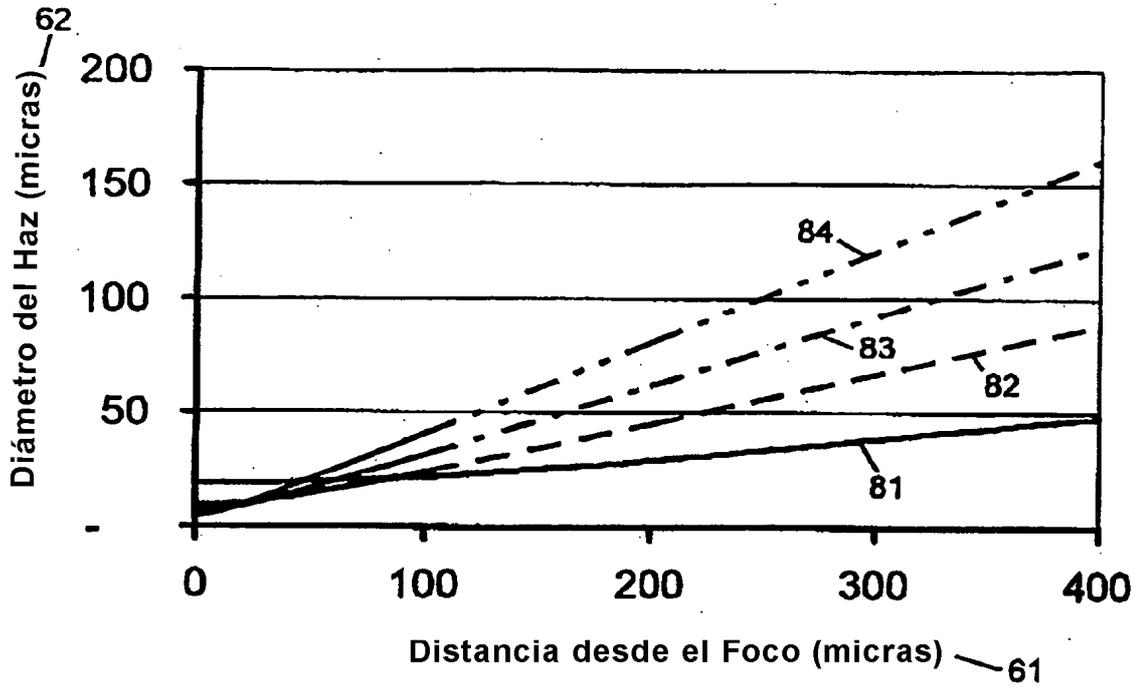


FIG 8

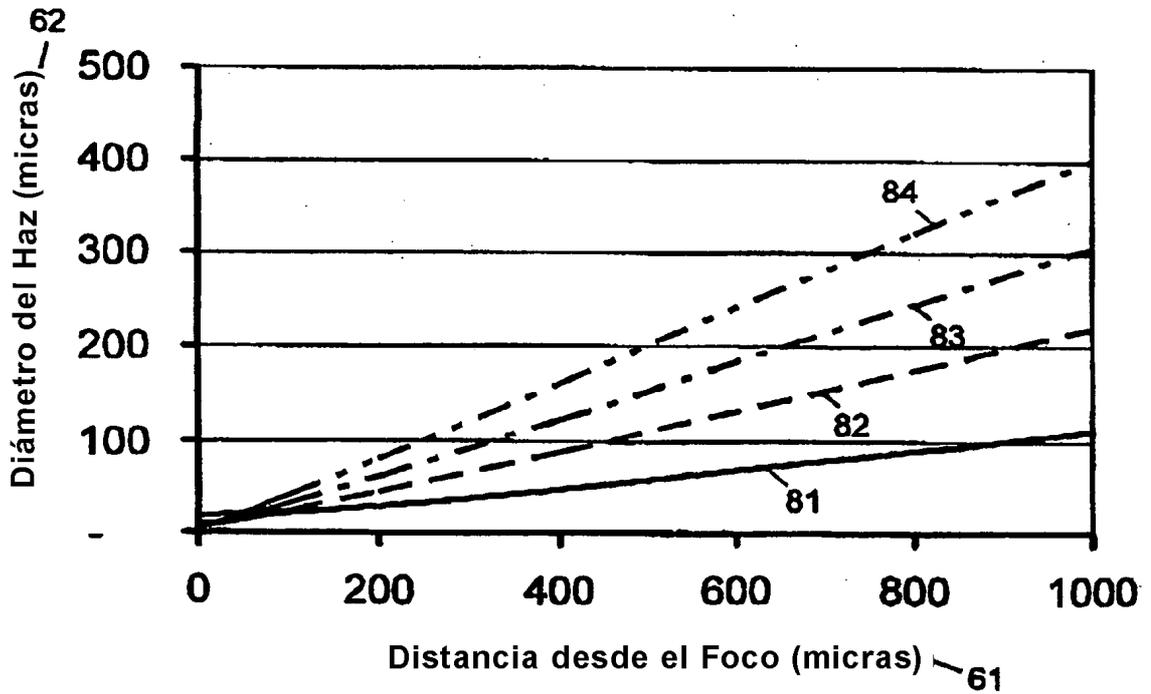


FIG 9