

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **3 020 564**

51 Int. Cl.:

C03B 33/02 (2006.01)

B23K 26/00 (2014.01)

B23K 26/53 (2014.01)

B23K 103/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **21.12.2017** **PCT/EP2017/084177**

87 Fecha y número de publicación internacional: **05.07.2018** **WO18122112**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **21.12.2017** **E 17825853 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.02.2025** **EP 3562790**

54 Título: **Procedimiento para separar sustratos y sustratos correspondientes**

30 Prioridad:

02.01.2017 DE 102017100015

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
23.05.2025

73 Titular/es:

SCHOTT AG (100.00%)
Hattenbergstraße 10
55122 Mainz, DE

72 Inventor/es:

WAGNER, FABIAN;
PLAPPER, VOLKER;
ORTNER, ANDREAS;
SCHMITT, SIMON;
LENTES, FRANK-THOMAS;
SEIDL, ALBRECHT;
MAKACS, ANTAL y
BARTHOLOME, PATRICK

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 3 020 564 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

Procedimiento para separar sustratos y sustratos correspondientes

la invención se refiere a un procedimiento para la separación asistida por láser de sustratos de vidrio, vitrocerámica o silicio, en el que se introducen daños espaciados entre sí en el sustrato a lo largo de una línea de separación predeterminada con un rayo láser pulsado. La invención se refiere además a una pieza de trabajo formada como un producto de vidrio, un producto vitrocerámico o un producto de silicio, que presenta daños distanciados entre sí a lo largo de una línea de separación.

Un procedimiento de corte ampliamente extendido en la industria del vidrio es el rayado y la rotura mecánicos. El procedimiento es económico, pero se limita esencialmente a cortes rectos. Tras la rotura, los cantos no presentan frecuentemente una calidad suficiente, de modo que puede ser necesario un procesamiento posterior que requiere mucho tiempo, por ejemplo mediante lijado, o bien pulido.

Otro procedimiento es el corte por chorro de agua, que permite ciertamente geometrías de forma libre, pero es relativamente lento y costoso, con una calidad simultáneamente limitada, de modo que normalmente es necesario un procesamiento posterior adicional de los bordes también en este procedimiento. Por lo tanto, el procedimiento de corte por chorro de agua se aplica predominantemente para geometrías complejas, que no se pueden producir con el rayado y la rotura y, en caso dado, un siguiente procesamiento posterior.

En el caso del procedimiento de trazado térmico por láser, el vidrio se calienta, por ejemplo, por medio de un láser de CO₂ a lo largo de una línea de corte e inmediatamente se vuelve a enfriar en gran medida. De este modo es posible obtener calidades de bordes y producir simultáneamente geometrías de forma libre, en donde, no obstante, los radios de curvatura de borde de corte no deben ser demasiado pequeños. Sin embargo, el trazado por láser no es adecuado, o solo lo es con elevadas pérdidas de calidad, para vidrios con mayor grosor, y en especial no para vidrios con bajo coeficiente de dilatación térmica.

Ante estos antecedentes, el procedimiento de filamentación por láser parece ser especialmente prometedor. A este respecto, se introduce en el vidrio una línea de separación, por ejemplo en forma de una perforación, con un láser de pulso ultracorto.

Como se describe, por ejemplo, en los documentos US2013/126573 A1 o WO 2012/006736 A2, se puede utilizar un rayo láser pulsado enfocado para generar filamentos en un sustrato transparente, en donde una trayectoria formada por varios filamentos posibilita la separación del sustrato. En este caso, un filamento se produce mediante un pulso láser corto de alta energía, en donde se supone que el efecto Kerr óptico no lineal conduce al autoenfoco del rayo láser, mediante lo cual se ocasiona la formación de plasma.

El documento US 2015/165548 A1 describe procedimientos para el biselado y/o achaflanado de un borde de un vidrio u otro sustrato utilizando láseres. En un primer procedimiento se utiliza un láser de pulso ultracorto y opcionalmente un láser de CO₂ a continuación. Un segundo procedimiento se basa en tensiones térmicas con diferentes combinaciones de láseres de pulso ultracorto y CO₂. Un tercer procedimiento se basa en tensiones que se inducen mediante intercambio iónico.

El documento US 2014/340730 A1 describe procedimientos para el corte de vidrio endurecido utilizando un láser, así como vidrio endurecido con bordes que presentan signos de un proceso de corte por láser.

También el documento DE 10 2012 110 971 A1 describe un procedimiento para la preparación por separación de piezas de trabajo transparentes, en el que se generan estructuras de filamento alineadas en yuxtaposición que se extienden transversalmente a través de la pieza de trabajo mediante pulsos láser ultracortos a lo largo de una línea de rotura predeterminada.

Después de introducir un trayectoria de filamentos por medio de filamentación por láser, en especial en forma de una línea de daño previo, o bien una línea de perforación, el vidrio se puede separar en otro paso denominado de corte. En este caso, la trayectoria de filamentos se traza, por ejemplo, con un láser de CO₂, de modo que el vidrio se separa a lo largo de la trayectoria de filamentos y, por lo tanto, a lo largo de una línea de separación prevista. No obstante, en especial en el caso de geometrías complejas o en el caso de materiales con bajos coeficientes de dilatación térmica, durante el paso de corte se pueden producir errores, de tal manera que la grieta no sigue la línea de separación introducida previamente y se desgarra, o que la grieta no se inicie, o bien se rompa. Se ha demostrado que tales problemas se pueden presentar de diferente manera para diferentes vidrios, es decir, a veces también puede depender del vidrio a separar en cada caso.

Por lo tanto, la invención tiene generalmente la tarea de optimizar el procedimiento de filamentación por láser con siguiente paso de corte, en especial respecto al material a separar en cada caso.

Un aspecto de la tarea de la invención es mejorar la calidad de borde de separación.

Según la invención, la tarea se soluciona mediante los objetos de las reivindicaciones independientes. Perfeccionamientos ventajosos son objetos de las reivindicaciones dependientes.

5 Por consiguiente, la invención se refiere a un procedimiento para la separación de un sustrato de material frágil y duro, a saber, de vidrio, vitrocerámica y/o silicio, en donde asistida por láser de sustratos de vidrio, vitrocerámica o silicio, en donde se introducen daños espaciados entre sí en el sustrato a lo largo de una línea de separación predeterminada con al menos un rayo láser pulsado.

10 Por consiguiente, se generan daños en forma de filamento en el volumen del sustrato en yuxtaposición a lo largo de una línea de separación, en donde el sustrato puede estar formado en especial como elemento de vidrio plano, como elemento vitrocerámico o como oblea de silicio plana. Los daños en forma de filamento se generan mediante pulsos de láser de un láser, en especial generando los pulsos de láser un plasma en el volumen del vidrio, en donde el material del sustrato para los pulsos de láser es transparente, y los puntos de incidencia de los pulsos de láser sobre el sustrato se mueven a través de su superficie a lo largo de la línea de separación.

15 En la introducción de daños, tanto la distancia media entre los daños adyacentes como el número de pulsos de láser para la generación de uno de los daños respectivamente se seleccionan de manera que (a) la tensión de rotura σ_B para la separación del sustrato a lo largo de la línea de separación es menor que una primera tensión de referencia dependiente del respectivo sustrato σ_{R1} , (b) la resistencia de borde σ_K de borde de separación es mayor que una segunda tensión de referencia dependiente del respectivo sustrato σ_{R2} y (c) el sustrato es separable tras la introducción de los daños mediante acción de una tensión.

20 En otras palabras, la filamentación por láser se efectúa respecto a la tensión de rotura del sustrato, en donde, en especial, el número de pulsos que se disparan en puntos de perforación individuales y la distancia de filamentos se seleccionan previamente de modo correspondiente. Además, también es posible seleccionar previamente la diferencia temporal entre los pulsos individuales para la generación de un filamento.

25 En este caso, se debe entender por tensión de rotura σ_B la tensión que es necesaria para introducir los daños en el sustrato a lo largo de una línea de separación, es decir, abrir el canal de filamentación. Para la tensión de rotura se considera $\sigma_B < \sigma_{R1}$, en donde la primera tensión de referencia σ_{R1} designa un valor dependiente del sustrato, en especial un valor que depende del material del sustrato y/o sus propiedades.

30 Además, con los parámetros de filamentación se puede influir también sobre la resistencia de borde. Se entiende por resistencia de borde σ_K la tensión que se debe aplicar para provocar una grieta en el sustrato con el borde de separación obtenido tras la separación y hacer que el sustrato se rompa. Para la resistencia de borde se considera $\sigma_K > \sigma_{R2}$, en donde la segunda tensión de referencia σ_{R2} designa de nuevo un valor dependiente del sustrato, en especial un valor que depende del material del sustrato y/o sus propiedades.

35 Según la invención, está previsto que (A) la primera y la segunda tensión de referencia $\sigma_{R1} = \sigma_{R2}$ sean idénticas y estén predeterminadas como una tensión térmica máxima σ_{th} dependiente del material del sustrato o, en el caso de un sustrato pretensado química o térmicamente, como una tensión de tracción interna σ_{CT} definida por las propiedades del sustrato pretensado, en donde, en el primer caso, la tensión térmica máxima σ_{th} es determinable según la fórmula $\sigma_{th} = 0,5 \cdot \alpha \cdot E \cdot (T_g - 100^\circ\text{C})$, en donde α designa el coeficiente de dilatación térmica del material del sustrato, E designa el módulo de elasticidad del material del sustrato y T_g designa la temperatura de transición vítrea del material del sustrato y en donde, en el segundo caso, con un sustrato pretensado químicamente, la tensión de tracción interna σ_{CT} es determinable según la fórmula $\sigma_{CT} = (\sigma_{CS} \cdot d_L) / (d - 2d_L)$ o, en el caso de un sustrato pretensado térmicamente, es determinable según la fórmula $\sigma_{CT} = \sigma_{CS} / 2$, en donde σ_{CS} designa la tensión compresiva superficial del sustrato pretensado, d_L designa la profundidad de penetración de la tensión y d designa el grosor del sustrato, o que (B) para la primera tensión de referencia se considere $\sigma_{R1} \leq C_{R1} \cdot \alpha \cdot E \cdot (T_g - 100^\circ\text{C})$ y para la segunda tensión de referencia se considere $\sigma_{R2} \geq C_{R2} \cdot \alpha \cdot E \cdot (T_g - 100^\circ\text{C})$, en donde C_{R1} y C_{R2} son coeficientes de tensión de referencia con $C_{R1} = 0,5/k$ y $C_{R2} = 0,5 \cdot k$ y $k = 1,5$, preferentemente $k = 2$, de modo especialmente preferente $k = 2,5$, u en donde α designa el coeficiente de dilatación térmica del material del sustrato, E designa el módulo de elasticidad del material del sustrato y T_g designa la temperatura de transición vítrea del material del sustrato.

40 Por consiguiente, en el caso (A), en especial está previsto que la primera y la segunda tensión de referencia sean idénticas y estén predeterminadas como una tensión térmica máxima dependiente del material del sustrato, es decir $\sigma_{R1} = \sigma_{R2} = \sigma_{th}$. En este caso, se entiende por tensión térmica máxima σ_{th} la tensión que se puede alcanzar como máximo mediante calentamiento puntual del sustrato, en especial por medio de un láser de CO_2 .

45 La tensión térmica máxima σ_{th} es determinable según la fórmula

50 $\sigma_{th} = 0,5 \cdot \alpha \cdot E \cdot (T_g - 100^\circ\text{C})$, en donde α designa el coeficiente de dilatación térmica del material del sustrato, E designa el módulo de elasticidad del material del sustrato y T_g designa la temperatura de transición vítrea del material del sustrato.

En el ámbito de una serie de ensayos DOE, que se abordarán más detalladamente más adelante, se pudo confirmar experimentalmente que el paso de corte en muestras de diferentes vidrios se consiguió de modo especialmente conveniente bajo las citadas condiciones, en especial $\sigma_B < 0,5 \cdot \alpha \cdot E \cdot (T_g - 100^\circ\text{C})$ y $\sigma_K > 0,5 \cdot \alpha \cdot E \cdot (T_g - 100^\circ\text{C})$.

En el caso (B) está previsto que, para la primera tensión de referencia se considere $\sigma_{R1} \leq C_{R1} \cdot \alpha \cdot E \cdot (T_g - 100^\circ\text{C})$ y para la segunda tensión de referencia se considere $\sigma_{R2} \geq C_{R2} \cdot \alpha \cdot E \cdot (T_g - 100^\circ\text{C})$, en donde C_{R1} y C_{R2} son coeficientes de tensión de referencia con $C_{R1}=0,5/k$ y $C_{R2}=0,5 \cdot k$ y $k=1,5$, preferentemente $k=2$, de modo especialmente preferente $k=2,5$, y en donde, a su vez, α designa el coeficiente de dilatación térmica del material del sustrato, E designa el módulo de elasticidad del material del sustrato y T_g designa la temperatura de transición vítrea del material del sustrato.

Por consiguiente, por ejemplo, en especial es preferente que para la tensión de rotura se considere $\sigma_B < 0,25 \cdot \alpha \cdot E \cdot (T_g - 100^\circ\text{C})$ y para la resistencia de borde se considere $\sigma_K > 0,5 \cdot \alpha \cdot E \cdot (T_g - 100^\circ\text{C})$. Puede ser aún más preferente que para la tensión de rotura se considere $\sigma_B < 0,25 \cdot \alpha \cdot E \cdot (T_g - 100^\circ\text{C})$ y para la resistencia de borde se considere $\sigma_K > \alpha \cdot E \cdot (T_g - 100^\circ\text{C})$. Es digno de mención que para la tensión de rotura se considere además preferentemente $\sigma_B > 1/20 \cdot \alpha \cdot E \cdot (T_g - 100^\circ\text{C})$.

A modo de ejemplo, si el valor de tensión del paso de corte introducida térmicamente se sitúa por encima del valor límite superior para la tensión de rotura, debido a la proximidad a T_g , el sustrato se puede relajar localmente, es decir, la tensión necesaria no se puede acumular y el paso de corte falla, en donde a este respecto se parte del valor medio de distribución de tensión.

Las anteriores explicaciones se consideran en especial para sustratos de vidrio, que no están pretensados. Por el contrario, en el caso del sustrato, o bien vidrio pretensado, el valor del coeficiente de dilatación térmica α es menos importante. Por lo tanto, es más importante la tensión de tracción interna σ_{CT} ("tensión central").

Por consiguiente, en el caso de un sustrato pretensado, en especial químicamente, está previsto que la primera y la segunda tensión de referencia sean idénticas y estén predeterminadas como una tensión de tracción interna definida mediante las propiedades del sustrato pretensado, es decir $\sigma_{R1} = \sigma_{R2} = \sigma_{CT}$.

La tensión de tracción interna σ_{CT} en el caso de un sustrato pretensado químicamente es determinable según la fórmula $\sigma_{CT} = (\sigma_{CS} \cdot d_L) / (d - 2d_L)$, en donde σ_{CS} designa la tensión compresiva superficial (tensión de compactación) del sustrato pretensado, d designa el grosor del sustrato, en especial del sustrato de vidrio plano, y d_L designa la profundidad de penetración de la tensión previa ("profundidad de capa", DoL), en otras palabras la distancia del paso por cero de la tensión de la superficie del sustrato, o bien el grosor de la capa de sustrato pretensada.

La tensión de tracción interna σ_{CT} en el sustrato pretensado térmicamente es determinable según la fórmula $\sigma_{CT} = \sigma_{CS}/2$, en donde σ_{CS} designa la tensión compresiva superficial (tensión de compactación) del sustrato pretensado.

Por consiguiente, para el proceso de corte puede ser preferente ajustar la tensión de rotura más reducida que la tensión de tracción interna σ_{CT} , pero la resistencia de borde claramente mayor. Por consiguiente, para el proceso de corte puede ser especialmente preferente ajustar la tensión de rotura más reducida que la suma de tensión de tracción interna σ_{CT} y tensión térmica σ_{th} , pero la resistencia de borde mayor, en especial claramente mayor.

Independientemente de que se trate de un sustrato tensado previamente o no tensado previamente, tras la introducción de daños, un punto de incidencia de una radiación láser, preferentemente de un láser de CO_2 , sobre el sustrato se puede mover a lo largo de la línea de separación para provocar la tensión que actúa a lo largo de la línea de separación para la separación. Este paso también se denomina paso de corte y se efectúa de modo ventajoso mediante las medidas descritas anteriormente.

Por medio del paso de corte, en, o bien a lo largo de la línea de separación se provocan tensiones termomecánicas locales en el sustrato, es decir, en especial en el elemento de vidrio, el elemento vitrocerámico, o bien el elemento de silicio, para ocasionar un agrietamiento entre daños en forma de filamento adyacentes, es decir, para unir daños en forma de filamento adyacentes mediante grietas.

De este modo se puede completar la perforación en al menos una junta de separación, es decir, a lo largo de la línea de separación se puede conseguir una separación o división del sustrato al menos parcial. Preferentemente se ocasiona una junta de separación completa.

Con la tensión de rotura, o bien resistencia de borde ajustada descrita anteriormente se optimizan las condiciones para la consecución del paso de corte en una serie de aspectos.

Por una parte, se consigue la separación de la línea de perforación también en el caso de materiales con coeficientes de dilatación térmica α relativamente reducidos. En especial, se pueden separar con éxito materiales, o bien vidrios con $\alpha < 5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, preferentemente con $\alpha < 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, de modo especialmente preferente con $\alpha < 4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Esto se pudo verificar en el ámbito de los ensayos DOE descritos más detalladamente a continuación.

Por otra parte, durante el paso de corte, la desviación lateral del punto láser de la línea de perforación puede ser mayor, es decir, la tolerancia de posición del punto de incidencia del láser CO₂ tiene que ser menos precisa sin que falle el paso de corte. Mientras que esta desviación lateral debe ser convencionalmente menor que 500 µm, con el procedimiento según la invención se pueden tolerar ventajosamente desviaciones laterales de hasta 3 mm. También esto se confirmó en el ámbito de los ensayos representados a continuación, en especial para materiales con $\alpha > 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, que se filamentaron, es decir, se perforaron como se ha descrito.

Además, la potencia del láser utilizado para el corte se puede reducir con velocidad constante.

La generación de daños se basa en el uso de un láser que emite preferentemente pulsos láser ultracortos (láser USP). Los pulsos láser generan daños en forma de filamento de manera precisa a lo largo de la línea de separación predeterminada en dirección transversal a través del sustrato, preferentemente plano, mediante la destrucción local del material en la zona de interacción con la luz láser. Los daños se forman típicamente como daños lineales definidos, cuya longitud se puede ver influenciada mediante selección de energías de pulso y duraciones de pulso apropiadas. Mediante generación de una pluralidad de filamentos situados a distancia apropiada entre sí se obtiene una perforación del material.

Mediante tal microperforación, en este caso se obtiene una calidad de borde muy elevada en los bordes de corte del sustrato. Por consiguiente, el procedimiento representa un procedimiento de separación de precisión que garantiza una calidad de borde elevada y definida y, por consiguiente, conduce en especial a una resistencia de borde, o bien resistencia a la flexión elevada y definida del sustrato tras la separación. En especial, las calidades de borde obtenidas son suficientemente elevadas para poder prescindir con frecuencia de un subsiguiente lijado de los bordes.

La generación de daños se efectúa en especial en el funcionamiento del láser de pulso ultracorto en el denominado modo de ráfaga. En este modo de funcionamiento, el pulso láser no se emite como pulso individual, sino como sucesión de pulsos emitidos sucesivamente, que forman en conjunto un paquete de pulsos, una denominada ráfaga, en donde se genera un daño preferentemente por medio de una ráfaga.

Tal paquete de pulsos presenta en general una energía algo mayor que un pulso individual en funcionamiento de único disparo habitual. No obstante, los pulsos de una ráfaga en sí contienen claramente menos energía que un pulso individual. Respecto a los pulsos dentro de una ráfaga puede estar previsto que las energías de pulso sean ajustables de manera flexible, en especial que las energías de pulso permanezcan esencialmente constantes o que las energías de pulso aumenten o que las energías de pulso disminuyan.

Una fuente de láser apropiada según la presente invención es un láser de itrio-aluminio-granate dopado con neodimio con una longitud de onda de 1064 nanómetros.

A modo de ejemplo, la fuente láser genera un haz bruto con un diámetro ($1/e^2$) de 12 mm, como óptica se pudo utilizar una lente biconvexa con una distancia focal de 16 mm. Para la generación del haz bruto se puede utilizar, a modo de ejemplo, una óptica de conformación de haz adecuada, como un telescopio de Galileo.

La fuente de láser funciona en especial con una tasa de repetición que se sitúa entre 1 kHz y 1000 kHz, preferentemente entre 10 kHz y 400 kHz, de modo especialmente preferente entre 30 kHz y 200 kHz.

La tasa de repetición y/o la velocidad de escaneo se puede seleccionar en este caso de modo que se consiga la distancia deseada entre daños en forma de filamento adyacentes.

La duración de pulso apropiada de un pulso láser se sitúa en un intervalo de menos de 100 picosegundos, preferentemente en menos de 20 picosegundos.

La potencia típica de la fuente láser se sitúa en este caso de modo especialmente conveniente en un intervalo de 20 a 300 vatios. Para obtener los daños en forma de filamento, según un perfeccionamiento ventajoso de la invención se utiliza una energía de pulso en la ráfaga de más de 400 microjulios, además ventajosamente una energía de ráfaga de más de 500 microjulios.

En el funcionamiento del láser de pulso ultracorto, la tasa de repetición es la tasa de recurrencia de emisión de ráfagas. La duración de pulso es esencialmente independiente de que se haga funcionar un láser en funcionamiento de pulso individual o en modo de ráfaga. Los pulsos dentro de una ráfaga presentan típicamente una longitud de pulso similar a un pulso en funcionamiento de pulso individual. La frecuencia de ráfaga se puede situar en el intervalo [15 MHz, 90 MHz], preferentemente en el intervalo [20 MHz, 85 MHz] y asciende, a modo de ejemplo, a 50 MHz y el número de pulsos en la ráfaga se puede situar entre 1 y 10 pulsos, por ejemplo 6 pulsos.

En el ámbito de la invención, en la introducción de daños, la distancia media entre daños adyacentes y el número de pulsos láser para la generación de uno de los daños respectivamente se selecciona respecto a la tensión de rotura σ_B y la resistencia de borde σ_K .

En este caso, el número de pulsos láser para la generación de un daño respectivamente se elige en especial a partir del intervalo [1, 20], preferentemente a partir del intervalo [1, 10], de modo especialmente preferente a partir del intervalo [2, 8].

- 5 La distancia media entre daños adyacentes se elige en especial a partir del intervalo [1 μm , 10 μm], preferentemente a partir del intervalo [3 μm , 8 μm], de modo especialmente preferente a partir del intervalo [5 μm , 7 μm]. Los intervalos se deben entender en especial continuamente, en donde en una forma de realización de la invención también puede estar previsto que se trate de intervalos discretos. La desviación estándar es preferentemente las distancias de daños adyacentes menores que 1 μm .
- 10 Con estas distancias, en donde están previstas en especial distancias relativamente elevadas entre los filamentos individuales de $> 5 \mu\text{m}$, preferentemente $> 7 \mu\text{m}$, por medio de la filamentación se puede ajustar la tensión de rotura apropiada, como se desprende de la serie de ensayos indicada más detalladamente a continuación.
- 15 El hecho de que se elijan distancias relativamente elevadas es sorprendente, ya que hasta el momento se había partido de que la fuerza de rotura aumentaba constantemente con distancias crecientes. No obstante, esta relación no se ha cumplido, como se muestra a continuación. Se parte de que la suposición de fuerza de rotura creciente se aplica de nuevo solo a partir de distancias de más de 8 μm .
- 20 Ya que este efecto, en contrapartida a la ráfaga o la distancia de ráfaga, también tiene influencia positiva sobre la rugosidad de borde, es especialmente ventajosa una distancia de filamentos elevada. En otras palabras, distancias de daños elevadas conducen a bordes más lisos. En este sentido, es ventajosa la elección de distancias entre filamentos más elevadas. Por lo demás, esto tiene una influencia positiva sobre la velocidad, ya que con láseres de la misma frecuencia se pueden obtener velocidades de corte claramente más elevadas.
- 25 En una primera forma de realización especial de la invención, el material del sustrato presenta un coeficiente de dilatación térmica en el intervalo [$3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$], un módulo de elasticidad en el intervalo [69 kN/mm^2 , 76 kN/mm^2] y/o una temperatura de transición vítrea en el intervalo [700°C, 800°C].
- 30 En esta primera forma de realización más especial, la distancia media entre daños adyacentes se selecciona a partir del intervalo [6 μm , 8 μm] y el número de pulsos láser para la generación de un daño respectivamente se selecciona a partir del intervalo [7, 9].
- 35 En una segunda forma de realización especial de la invención, el material del sustrato presenta un coeficiente de dilatación térmica en el intervalo [$7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$], un módulo de elasticidad en el intervalo [69 kN/mm^2 , 76 kN/mm^2] y/o una temperatura de transición vítrea en el intervalo [500°C, 600°C].
- 40 En esta segunda forma de realización más especial, la distancia media entre daños adyacentes se selecciona a partir del intervalo [6 μm , 8 μm] y el número de pulsos láser para la generación de un daño respectivamente se selecciona a partir del intervalo [1, 3].
- 45 En una tercera forma de realización especial de la invención, el material del sustrato presenta un coeficiente de dilatación térmica en el intervalo [$3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$], un módulo de elasticidad en el intervalo [60 kN/mm^2 , 68 kN/mm^2] y/o una temperatura de transición vítrea en el intervalo [500°C, 600°C].
- 50 En esta tercera forma de realización más especial, la distancia media entre daños adyacentes se selecciona a partir del intervalo [4 μm , 8 μm] y el número de pulsos láser para la generación de un daño respectivamente se selecciona a partir del intervalo [7, 9] o la distancia media entre daños adyacentes se selecciona a partir del intervalo [6 μm , 8 μm] y el número de pulsos láser para la generación de un daño respectivamente se selecciona a partir del intervalo [3, 5].
- Independientemente de las tres formas de realización más especiales citadas anteriormente y, en caso dado, en combinación con estas formas de realización más especiales, el sustrato puede comprender o estar hecho de material de un tipo de vidrio determinado y/o una composición de vidrio determinada.
- 55 A modo de ejemplo, el sustrato puede ser un vidrio de aluminosilicato de litio con la siguiente composición (en % en peso):

Composición	(% en peso)
SiO ₂	55-69
Al ₂ O ₃	18-25
Li ₂ O	3-5
Na ₂ O + K ₂ O	0-30
MgO + CaO + SrO + BaO	0-5

Composición	(% en peso)
ZnO	0-4
TiO ₂	0-5
ZrO ₂	0-5
TiO ₂ + ZrO ₂ + SnO ₂	2-6
P ₂ O ₅	0-8
F	0-1
B ₂ O ₃	0-2

- 5 En caso dado, se pueden añadir óxidos colorantes como Nd₂O₃, Fe₂O₃, CoO, NiO, V₂O₅, MnO₂, TiO₂, CuO, CeO₂, Cr₂O₃, 0 - 2 % en peso de As₂O₃, Sb₂O₃, SnO₂, SO₃, Cl, F y/o CeO₂ como agentes de refinado, y asimismo se puede añadir 0 - 5 % en peso de óxidos de tierras raras para introducir funciones magnéticas, fotónicas u ópticas en la capa o placa de vidrio, y la cantidad total de la composición total asciende a 100 % en peso.

En especial, un material de la composición citada anteriormente puede presentar un coeficiente de dilatación térmica entre $3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ o entre $3,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $5,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

- 10 El vidrio de aluminosilicato de litio presenta preferentemente la siguiente composición (en % en peso):

Composición	(% en peso)
SiO ₂	57-66
Al ₂ O ₃	18-23
Li ₂ O	3-5
Na ₂ O + K ₂ O	3-25
MgO + CaO + SrO + BaO	1-4
ZnO	0-4
TiO ₂	0-4
ZrO ₂	0-5
TiO ₂ + ZrO ₂ + SnO ₂	2-6
P ₂ O ₅	0-7
F	0-1
B ₂ O ₃	0-2

- 15 En caso dado, se pueden añadir óxidos colorantes como Nd₂O₃, Fe₂O₃, CoO, NiO, V₂O₅, MnO₂, TiO₂, CuO, CeO₂, Cr₂O₃, 0 - 2 % en peso de As₂O₃, Sb₂O₃, SnO₂, SO₃, Cl, F y/o CeO₂ como agentes de refinado, y asimismo se puede añadir 0 - 5 % en peso de óxidos de tierras raras para introducir funciones magnéticas, fotónicas u ópticas en la capa o placa de vidrio, y la cantidad total de la composición total asciende a 100 % en peso.

En especial, un material de la composición citada anteriormente puede presentar un coeficiente de dilatación térmica entre $4,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ o entre $4,76 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $5,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

- 20 El vidrio de aluminosilicato de litio presenta aún más preferentemente la siguiente composición (en % en peso):

Composición	(% en peso)
SiO ₂	57-63
Al ₂ O ₃	18-22
Li ₂ O	3,5-5
Na ₂ O + K ₂ O	5-20
MgO + CaO + SrO + BaO	0-5
ZnO	0-3
TiO ₂	0-3
ZrO ₂	0-5

Composición	(% en peso)
TiO ₂ + ZrO ₂ + SnO ₂	2-5
P ₂ O ₅	0-5
F	0-1
B ₂ O ₃	0-2

En caso dado, se pueden añadir óxidos colorantes como Nd₂O₃, Fe₂O₃, CoO, NiO, V₂O₅, MnO₂, TiO₂, CuO, CeO₂, Cr₂O₃, 0 - 2 % en peso de As₂O₃, Sb₂O₃, SnO₂, SO₃, Cl, F y/o CeO₂ como agentes de refinado, y se pueden añadir como agentes de refinado, y asimismo se puede añadir 0 - 5 % en peso de óxidos de tierras raras para introducir funciones magnéticas, fotónicas u ópticas en la capa o placa de vidrio, y la cantidad total de la composición total asciende a 100 % en peso.

En especial, un material de la composición citada anteriormente puede presentar un coeficiente de dilatación térmica entre $4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ o entre $5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. También puede estar prevista una correspondiente vitrocerámica que presenta un coeficiente de dilatación térmica entre $-0,068 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $1,16 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

En otro ejemplo, el sustrato es un vidrio de silicato sodocálcico con la siguiente composición (en % en peso):

Composición	(% en peso)
SiO ₂	40-81
Al ₂ O ₃	0-6
B ₂ O ₃	0-5
Li ₂ O + Na ₂ O + K ₂ O	5-30
MgO + CaO + SrO + BaO + ZnO	5-30
TiO ₂ + ZrO ₂	0-7
P ₂ O ₅	0-2

En caso dado, se pueden añadir óxidos colorantes como Nd₂O₃, Fe₂O₃, CoO, NiO, V₂O₅, MnO₂, TiO₂, CuO, CeO₂, Cr₂O₃, 0 - 2 % en peso de As₂O₃, Sb₂O₃, SnO₂, SO₃, Cl, F y/o CeO₂ como agentes de refinado, y asimismo se puede añadir 0 - 5 % en peso de óxidos de tierras raras para introducir funciones magnéticas, fotónicas u ópticas en la capa o placa de vidrio, y la cantidad total de la composición total asciende a 100 % en peso.

En especial, un material de la composición citada anteriormente puede presentar un coeficiente de dilatación térmica entre $5,25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ o entre $5,53 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $9,77 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

El vidrio de silicato sodocálcico presenta preferentemente la siguiente composición (en % en peso):

Composición	(% en peso)
SiO ₂	50-81
Al ₂ O ₃	0-5
B ₂ O ₃	0-5
Li ₂ O + Na ₂ O + K ₂ O	5-28
MgO + CaO + SrO + BaO + ZnO	5-25
TiO ₂ + ZrO ₂	0-6
P ₂ O ₅	0-2

En caso dado, se pueden añadir óxidos colorantes como Nd₂O₃, Fe₂O₃, CoO, NiO, V₂O₅, MnO₂, TiO₂, CuO, CeO₂, Cr₂O₃, 0 - 2 % en peso de As₂O₃, Sb₂O₃, SnO₂, SO₃, Cl, F y/o CeO₂ como agentes de refinado, y asimismo se puede añadir 0 - 5 % en peso de óxidos de tierras raras para introducir funciones magnéticas, fotónicas u ópticas en la capa o placa de vidrio, y la cantidad total de la composición total asciende a 100 % en peso.

En especial, un material de la composición citada anteriormente puede presentar un coeficiente de dilatación térmica entre $4,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ o entre $4,94 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $10,25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

El vidrio de silicato sodocálcico presenta aún más preferentemente la siguiente composición (en % en peso):

Composición	(% en peso)
SiO ₂	55-76
Al ₂ O ₃	0-5
B ₂ O ₃	0-5
Li ₂ O + Na ₂ O + K ₂ O	5-25
MgO + CaO + SrO + BaO + ZnO	5-20
TiO ₂ + ZrO ₂	0-5
P ₂ O ₅	0-2

En caso dado, se pueden añadir óxidos colorantes como Nd₂O₃, Fe₂O₃, CoO, NiO, V₂O₅, MnO₂, TiO₂, CuO, CeO₂, Cr₂O₃, 0 - 2 % en peso de As₂O₃, Sb₂O₃, SnO₂, SO₃, Cl, F y/o CeO₂ como agentes de refinado, y asimismo se puede añadir 0 - 5 % en peso de óxidos de tierras raras para introducir funciones magnéticas, fotónicas u ópticas en la capa o placa de vidrio, y la cantidad total de la composición total asciende a 100 % en peso.

En especial, un material de la composición citada anteriormente puede presentar un coeficiente de dilatación térmica entre $4,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ o entre $4,93 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $10,25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

En otro ejemplo, el sustrato es un vidrio de borosilicato con la siguiente composición (en % en peso):

Composición	(% en peso)
SiO ₂	60-85
Al ₂ O ₃	0-10
B ₂ O ₃	5-20
Li ₂ O + Na ₂ O + K ₂ O	2-16
MgO + CaO + SrO + BaO + ZnO	0-15
TiO ₂ + ZrO ₂	0-5
P ₂ O ₅	0-2

En caso dado, se pueden añadir óxidos colorantes como Nd₂O₃, Fe₂O₃, CoO, NiO, V₂O₅, MnO₂, TiO₂, CuO, CeO₂, Cr₂O₃, 0 - 2 % en peso de As₂O₃, Sb₂O₃, SnO₂, SO₃, Cl, F y/o CeO₂ como agentes de refinado, y asimismo se puede añadir 0 - 5 % en peso de óxidos de tierras raras para introducir funciones magnéticas, fotónicas u ópticas en la capa o placa de vidrio, y la cantidad total de la composición total asciende a 100 % en peso.

En especial, un material de la composición citada anteriormente puede presentar un coeficiente de dilatación térmica entre $2,75 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ o entre $3,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $9,01 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

El vidrio de borosilicato presenta más preferentemente la siguiente composición (en % en peso):

Composición	(% en peso)
SiO ₂	63-84
Al ₂ O ₃	0-8
B ₂ O ₃	5-18
Li ₂ O + Na ₂ O + K ₂ O	3-14
MgO + CaO + SrO + BaO + ZnO	0-12
TiO ₂ + ZrO ₂	0-4
P ₂ O ₅	0-2

En caso dado, se pueden añadir óxidos colorantes como Nd₂O₃, Fe₂O₃, CoO, NiO, V₂O₅, MnO₂, TiO₂, CuO, CeO₂, Cr₂O₃, 0 - 2 % en peso de As₂O₃, Sb₂O₃, SnO₂, SO₃, Cl, F y/o CeO₂ como agentes de refinado, y asimismo se puede añadir 0 - 5 % en peso de óxidos de tierras raras para introducir funciones magnéticas, fotónicas u ópticas en la capa o placa de vidrio, y la cantidad total de la composición total asciende a 100 % en peso.

En especial, un material de la composición citada anteriormente puede presentar un coeficiente de dilatación térmica entre $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ o entre $2,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $7,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

El vidrio de borosilicato presenta aún más preferentemente la siguiente composición (en % en peso):

Composición	(% en peso)
SiO ₂	63-83
Al ₂ O ₃	0-7
B ₂ O ₃	5-18
Li ₂ O + Na ₂ O + K ₂ O	4-14
MgO + CaO + SrO + BaO + ZnO	0-10
TiO ₂ + ZrO ₂	0-3
P ₂ O ₅	0-2

- 5 En caso dado, se pueden añadir óxidos colorantes como Nd₂O₃, Fe₂O₃, CoO, NiO, V₂O₅, MnO₂, TiO₂, CuO, CeO₂, Cr₂O₃, 0 - 2 % en peso de As₂O₃, Sb₂O₃, SnO₂, SO₃, Cl, F y/o CeO₂ como agentes de refinado, y asimismo se puede añadir 0 - 5 % en peso de óxidos de tierras raras para introducir funciones magnéticas, fotónicas u ópticas en la capa o placa de vidrio, y la cantidad total de la composición total asciende a 100 % en peso.

- 10 En especial, un material de la composición citada anteriormente puede presentar un coeficiente de dilatación térmica entre $3,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ o entre $3,18 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $7,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

En otro ejemplo, el sustrato es un vidrio de aluminosilicato de metal alcalino con la siguiente composición (en % en peso):

Composición	(% en peso)
SiO ₂	40-75
Al ₂ O ₃	10-30
B ₂ O ₃	0-20
Li ₂ O + Na ₂ O + K ₂ O	4-30
MgO + CaO + SrO + BaO + ZnO	0-15
TiO ₂ + ZrO ₂	0-15
P ₂ O ₅	0-10

- 15 En caso dado, se pueden añadir óxidos colorantes como Nd₂O₃, Fe₂O₃, CoO, NiO, V₂O₅, MnO₂, TiO₂, CuO, CeO₂, Cr₂O₃, 0 - 2 % en peso de As₂O₃, Sb₂O₃, SnO₂, SO₃, Cl, F y/o CeO₂ como agentes de refinado, y asimismo se puede añadir 0 - 5 % en peso de óxidos de tierras raras para introducir funciones magnéticas, fotónicas u ópticas en la capa o placa de vidrio, y la cantidad total de la composición total asciende a 100 % en peso.

- 20 En especial, un material de la composición citada anteriormente puede presentar un coeficiente de dilatación térmica entre $3,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ o entre $3,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

El vidrio de aluminosilicato de metal alcalino presenta aún más preferentemente la siguiente composición (en % en peso):

25

Composición	(% en peso)
SiO ₂	50-70
Al ₂ O ₃	10-27
B ₂ O ₃	0-18
Li ₂ O + Na ₂ O + K ₂ O	5-28
MgO + CaO + SrO + BaO + ZnO	0-13
TiO ₂ + ZrO ₂	0-13
P ₂ O ₅	0-9

- 30 En caso dado, se pueden añadir óxidos colorantes como Nd₂O₃, Fe₂O₃, CoO, NiO, V₂O₅, MnO₂, TiO₂, CuO, CeO₂, Cr₂O₃, 0 - 2 % en peso de As₂O₃, Sb₂O₃, SnO₂, SO₃, Cl, F y/o CeO₂ como agentes de refinado, y asimismo se puede añadir 0 - 5 % en peso de óxidos de tierras raras para introducir funciones magnéticas, fotónicas u ópticas en la capa o placa de vidrio, y la cantidad total de la composición total asciende a 100 % en peso.

En especial, un material de la composición citada anteriormente puede presentar un coeficiente de dilatación térmica entre $3,75 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ o entre $3,99 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $10,22 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

El vidrio de aluminosilicato alcalino presenta aún más preferentemente la siguiente composición (en % en peso):

5

Composición	(% en peso)
SiO ₂	55-68
Al ₂ O ₃	10-27
B ₂ O ₃	0-15
Li ₂ O + Na ₂ O + K ₂ O	4-27
MgO + CaO + SrO + BaO + ZnO	0-12
TiO ₂ + ZrO ₂	0-10
P ₂ O ₅	0-8

En caso dado, se pueden añadir óxidos colorantes como Nd₂O₃, Fe₂O₃, CoO, NiO, V₂O₅, MnO₂, TiO₂, CuO, CeO₂, Cr₂O₃, 0 - 2 % en peso de As₂O₃, Sb₂O₃, SnO₂, SO₃, Cl, F y/o CeO₂ como agentes de refinado, y asimismo se puede añadir 0 - 5 % en peso de óxidos de tierras raras para introducir funciones magnéticas, fotónicas u ópticas en la capa o placa de vidrio, y la cantidad total de la composición total asciende a 100 % en peso.

10

En especial, un material de la composición citada anteriormente puede presentar un coeficiente de dilatación térmica entre $4,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ o entre $4,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $9,08 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

15

En otro ejemplo, el sustrato es un vidrio de aluminosilicato con bajo contenido en álcali con la siguiente composición (en % en peso):

Composición	(% en peso)
SiO ₂	50-75
Al ₂ O ₃	7-25
B ₂ O ₃	0-20
Li ₂ O + Na ₂ O + K ₂ O	0-4
MgO + CaO + SrO + BaO + ZnO	5-25
TiO ₂ +ZrO ₂	0-10
P ₂ O ₅	0-5

20

En caso dado, se pueden añadir óxidos colorantes como Nd₂O₃, Fe₂O₃, CoO, NiO, V₂O₅, MnO₂, TiO₂, CuO, CeO₂, Cr₂O₃, 0 - 2 % en peso de As₂O₃, Sb₂O₃, SnO₂, SO₃, Cl, F y/o CeO₂ como agentes de refinado, y asimismo se puede añadir 0 - 5 % en peso de óxidos de tierras raras para introducir funciones magnéticas, fotónicas u ópticas en la capa o placa de vidrio, y la cantidad total de la composición total asciende a 100 % en peso.

25

En especial, un material de la composición citada anteriormente puede presentar un coeficiente de dilatación térmica entre $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ o entre $2,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $6,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

El vidrio de aluminosilicato con bajo contenido en álcali presenta más preferentemente la siguiente composición (en % en peso):

30

Composición	(% en peso)
SiO ₂	52-73
Al ₂ O ₃	7-23
B ₂ O ₃	0-18
Li ₂ O + Na ₂ O + K ₂ O	0-4
MgO + CaO + SrO + BaO + ZnO	5-23
TiO ₂ +ZrO ₂	0-10
P ₂ O ₅	0-5

En caso dado, se pueden añadir óxidos colorantes como Nd_2O_3 , Fe_2O_3 , CoO , NiO , V_2O_5 , MnO_2 , TiO_2 , CuO , CeO_2 , Cr_2O_3 , 0 - 2 % en peso de As_2O_3 , Sb_2O_3 , SnO_2 , SO_3 , Cl , F y/o CeO_2 como agentes de refinado, y asimismo se puede añadir 0 - 5 % en peso de óxidos de tierras raras para introducir funciones magnéticas, fotónicas u ópticas en la capa o placa de vidrio, y la cantidad total de la composición total asciende a 100 % en peso.

En especial, un material de la composición citada anteriormente puede presentar un coeficiente de dilatación térmica entre $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ o entre $2,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $6,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

El vidrio de aluminosilicato con bajo contenido en álcali presenta aún más preferentemente la siguiente composición (en % en peso):

Composición	(% en peso)
SiO_2	53-71
Al_2O_3	7-22
B_2O_3	0-18
$\text{Li}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	0-4
$\text{MgO} + \text{CaO} + \text{SrO} + \text{BaO} + \text{ZnO}$	5-22
$\text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2$	0-8
P_2O_5	0-5

En caso dado, se pueden añadir óxidos colorantes como Nd_2O_3 , Fe_2O_3 , CoO , NiO , V_2O_5 , MnO_2 , TiO_2 , CuO , CeO_2 , Cr_2O_3 , 0 - 2 % en peso de As_2O_3 , Sb_2O_3 , SnO_2 , SO_3 , Cl , F y/o CeO_2 como agentes de refinado, y asimismo se puede añadir 0 - 5 % en peso de óxidos de tierras raras para introducir funciones magnéticas, fotónicas u ópticas en la capa o placa de vidrio, y la cantidad total de la composición total asciende a 100 % en peso.

En especial, un material de la composición citada anteriormente puede presentar un coeficiente de dilatación térmica entre $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ o entre $2,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $6,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

El sustrato también puede presentar un grosor menor que 350 μm , preferentemente menor que 250 μm , preferentemente menor que 100 μm , de modo especialmente preferente menor que 50 μm y preferentemente de al menos 3 μm , preferentemente de al menos 10 μm , de modo especialmente preferente de al menos 15 μm . Grosos de sustrato preferentes son 5, 10, 15, 25, 30, 35, 50, 55, 70, 80, 100, 130, 145, 160, 190, 210 o 280 μm . El sustrato puede estar formado en especial como banda de vidrio delgada, o bien como lámina de vidrio.

Para la mejor comprensión de la invención, cítese de forma más general un procedimiento para la separación de un sustrato, en especial de un sustrato de material frágil y duro, especialmente de vidrio, vitrocerámica o silicio, que comprende los pasos de procedimiento.

a) Proporcionar al menos un sustrato plano, en especial un elemento de vidrio, un elemento vitrocerámico o un elemento de silicio, con al menos un valor característico de material conocido, en especial el coeficiente de dilatación térmica, el módulo de elasticidad y/o la temperatura de transición vítrea y/o al menos una propiedad de sustrato, en especial el grado de transmisión, por ejemplo para la luz láser, y/o la rugosidad media R_a de al menos una de las superficies del sustrato.

b) Determinar al menos un parámetro de proceso, en especial una distancia de daño, un número de pulsos láser y/o una frecuencia de ráfaga, en función del al menos un valor característico de material conocido y/o de al menos una propiedad de sustrato conocida.

c) Introducir daños distanciados entre sí a lo largo de una línea de separación predeterminada por medio de pulsos láser de un láser en el sustrato plano correspondientemente a al menos un parámetro de proceso determinado.

Preferentemente, puede estar previsto que la transmisión del sustrato, en especial para el rayo láser pulsado, es superior a 70 %, preferentemente superior a 80 %, de modo especialmente preferente superior a 85 %. Además, la rugosidad media R_a es preferentemente menor que 0,5 μm , preferentemente menor que 0,4 μm , de modo especialmente preferente menor que 0,35 μm .

La invención se refiere también a una pieza de trabajo de vidrio, vitrocerámica y/o silicio, en especial un producto de vidrio, un producto vitrocerámico o un producto de silicio, que está dañado previamente a lo largo de una línea de separación, caracterizado por que la pieza de trabajo presenta daños distanciados entre sí a lo largo de la línea de separación y por que la tensión de rotura σ_B , para la separación de la pieza de trabajo a lo largo de la línea de separación, es menor que la primera tensión de referencia σ_{R1} dependiente de la respectiva pieza de trabajo y por que

la resistencia de borde σ_K de borde de separación obtenido tras la separación es mayor que una segunda tensión de referencia σ_{R2} dependiente de la respectiva pieza de trabajo.

Según la invención, está previsto que (A) tanto la primera como la segunda tensión de referencia $\sigma_{R1} = \sigma_{R2}$ estén predeterminadas como una tensión térmica máxima σ_{th} dependiente del material de la pieza de trabajo o, en el caso de una pieza de trabajo pretensada química o térmicamente, como una tensión de tracción interna σ_{CT} definida por las propiedades de la pieza de trabajo pretensada, en donde, en el primer caso, la tensión térmica máxima σ_{th} es determinable según la fórmula $\sigma_{th} = 0,5 \cdot \alpha \cdot E \cdot (T_g - 100^\circ\text{C})$, en donde α designa el coeficiente de dilatación térmica del material de la pieza de trabajo, E designa el módulo de elasticidad del material de la pieza de trabajo y T_g designa la temperatura de transición vítrea del material de la pieza de trabajo y en donde, en el segundo caso, con un sustrato pretensado químicamente, la tensión de tracción interna σ_{CT} es determinable según la fórmula $\sigma_{CT} = (\sigma_{CS} \cdot d_L) / (d - 2d_L)$ o, en el caso de un sustrato pretensado térmicamente, es determinable según la fórmula $\sigma_{CT} = \sigma_{CS} / 2$, en donde σ_{CS} designa la tensión compresiva superficial de la pieza de trabajo pretensada, d_L designa la profundidad de penetración de la tensión y previa y d designa el grosor del sustrato, o que (B) para la primera tensión de referencia se considere $\sigma_{R1} \leq C_{R1} \cdot \alpha \cdot E \cdot (T_g - 100^\circ\text{C})$ y para la segunda tensión de referencia se considere $\sigma_{R2} \geq C_{R2} \cdot \alpha \cdot E \cdot (T_g - 100^\circ\text{C})$, en donde C_{R1} y C_{R2} son coeficientes de tensión de referencia con $C_{R1} = 0,5/k$ y $C_{R2} = 0,5 \cdot k$ y $k = 1,5$, preferentemente $k = 2$, de modo especialmente preferente $k = 2,5$, u en donde α designa el coeficiente de dilatación térmica del material de la pieza de trabajo, E designa el módulo de elasticidad del material de la pieza de trabajo y T_g designa la temperatura de transición vítrea del material de la pieza de trabajo. Por consiguiente, en el caso (A) está previsto que estén predeterminadas tanto la primera como la segunda tensión de referencia como una tensión térmica máxima $\sigma_{R1} = \sigma_{R2} = \sigma_{th}$ dependiente del material de la pieza de trabajo, en donde la tensión térmica máxima σ_{th} es determinable según la fórmula $\sigma_{th} = 0,5 \cdot \alpha \cdot E \cdot (T_g - 100^\circ\text{C})$

En el caso (B) está previsto que para la primera tensión de referencia se considere $\sigma_{R1} \leq C_{R1} \cdot \alpha \cdot E \cdot (T_g - 100^\circ\text{C})$ y para la segunda tensión de referencia se considere

$\sigma_{R2} \geq C_{R2} \cdot \alpha \cdot E \cdot (T_g - 100^\circ\text{C})$, en donde C_{R1} y C_{R2} son coeficientes de referencia con $C_{R1} = 0,5/k$ y $C_{R2} = 0,5 \cdot k$ y $k = 1,5$, preferentemente $k = 2$, de modo especialmente preferente $k = 2,5$.

Las piezas de trabajo descritas anteriormente no están pretensadas de modo preferente. Sin embargo, también puede estar prevista una pieza de trabajo pretensada, en especial de vidrio.

En el caso de una pieza de trabajo pretensada está previsto que la primera y la segunda tensión de referencia sean idénticas y estén predeterminadas como una tensión de tracción interna definida mediante las propiedades de la pieza de trabajo pretensada, es decir $\sigma_{R1} = \sigma_{R2} = \sigma_{CT}$. En el caso de que la pieza de trabajo esté pretensada químicamente, la tensión de tracción interna σ_{CT} es determinable según la fórmula $\sigma_{CT} = (\sigma_{CS} \cdot d_L) / (d - 2d_L)$. En el caso de que la pieza de trabajo esté pretensada térmicamente, la tensión de tracción interna σ_{CT} es determinable según la fórmula $\sigma_{CT} = \sigma_{CS} / 2$.

A continuación se hace referencia a las figuras adjuntas. En las figuras, signos de referencia iguales designan elementos iguales o correspondientes.

Muestran:

la Fig. 1: resultados de ensayo de tensión de rotura σ_B y resistencia de borde σ_K en MPa para vidrio SCHOTT AF32® con daños a lo largo de una línea de separación para diferentes distancias A entre daños adyacentes y diferentes números L de pulsos láser para la generación de un daño respectivamente,

la Fig. 2: resultados de ensayo de tensión de rotura σ_B y resistencia de borde σ_K en MPa para vidrio SCHOTT D263® con daños a lo largo de una línea de separación para diferentes distancias A entre daños adyacentes y diferentes números L de pulsos láser para la generación de un daño respectivamente,

la Fig. 3: resultados de ensayo de tensión de rotura σ_B y resistencia de borde σ_K en MPa para vidrio SCHOTT BOROFLOAT® 33 con daños a lo largo de una línea de separación para diferentes distancias A entre daños adyacentes y diferentes números L de pulsos láser para la generación de un daño respectivamente,

la Fig. 4: resultados de ensayo de rugosidad de borde en MPa para vidrio SCHOTT BOROFLOAT® 33 con daños a lo largo de una línea de separación para diferentes distancias A entre daños adyacentes y diferentes números L de pulsos láser para la generación de un daño respectivamente,

la Fig. 5: una pieza de trabajo con dos líneas de separación que se cruzan entre sí,

la Fig. 6 una pieza de trabajo con dos grupos de líneas de separación que se cruzan,

la Fig. 7 un elemento recortado de una pieza de trabajo,

la Fig. 8 una variante del ejemplo de realización representado en la Fig. 6 con una barra para la mantener unida la pieza de trabajo separada en tiras,

la Fig. 9 y la Fig. 10 variantes del ejemplo de realización representado en la Fig. 6 con un marco para mantener unida la pieza de trabajo separada en tiras,

la Fig. 11 una pieza de trabajo sobre un soporte,

la Fig. 12 una forma de realización de una pieza de trabajo subdividida en varias piezas de trabajo.

Con referencia a las Figs. 1 a 3, se representan los resultados de una serie de ensayo DOE para tres vidrios diferentes, esto es SCHOTT AF32® (Fig. 1), SCHOTT D263® (Fig. 2) y SCHOTT BOROFLOAT® 33 (Fig. 3).

A este respecto se trata de una selección de ejemplos. Generalmente, la invención se puede utilizar para diferentes sustratos, en especial de vidrio, vitrocerámica y/o silicio con filamentación, en especial también para materiales con coeficiente de dilatación térmica reducido.

Para una pluralidad de muestras de estos vidrios se efectuó respectivamente una filamentación, es decir, con pulsos láser de un láser se introdujeron en el volumen de la respectiva muestra daños distanciados entre sí a lo largo de una línea de separación.

Para las muestras de SCHOTT AF32®, o bien SCHOTT D263® se seleccionaron en especial grosores de sustrato de aproximadamente 100 µm y para las muestras de SCHOTT BOROFLOAT® 33 se seleccionaron en especial grosores de sustrato de 1 mm.

Tras la filamentación se comprobó respectivamente la resistencia a la rotura σ_B del vidrio en relación con la línea de separación filamentada. En otras palabras, las muestras se separaron a lo largo de la línea de separación, en donde para la separación se midió y se registró la tensión de rotura necesaria para la separación. A tal efecto, según grosor de material se realizó el procedimiento de resistencia a la flexión en 4 puntos según la norma DIN EN 843-1 (vidrios más gruesos), o bien una determinación de la resistencia a la rotura según la norma DE 10 2014 110 855 A1 (vidrios más delgados) con un rodillo escalonado. El documento DE 10 2014 110 855 A1 describe un procedimiento y un dispositivo para la determinación de la resistencia a la rotura de los bordes de bandas delgadas de material quebradizo.

En un siguiente paso se comprobó la resistencia de cada borde de separación obtenido tras la separación para cada una de las muestras. Para la determinación de la respectiva resistencia de borde σ_K se comprobaron las muestras a su vez según grosor de material por medio del procedimiento según la norma DIN EN 843-1 (vidrios más gruesos), o bien el documento DE 10 2014 110 855 A1 (vidrios más delgados) y se midieron y se registraron los resultados.

Las tensiones de rotura obtenidas de este modo σ_B y las resistencias de borde σ_K se representan en las Figs. 1 a 3 en el eje de ordenadas en unidades de MPa. Las tensiones de rotura σ_B están caracterizadas por B en el pie de la representación, las resistencias de borde σ_K están representadas correspondientemente mediante K.

La filamentación por láser se realizó además con diferentes parámetros, es decir, se generaron muestras perforadas de diferente manera. Se variaron las distancias entre daños adyacentes y los números de pulsos láser para la generación de un daño respectivamente. Estos parámetros se ajustaron respectivamente para una muestra y se mantuvieron constantes durante la filamentación de una determinada muestra.

En las Figs. 1 a 3 se representan las tensiones de rotura σ_B y las resistencias de borde σ_K correspondientemente para los diferentes parámetros de filamentación por láser, que se aplican al eje de abscisas. A este respecto, se denominan A las distancias entre daños adyacentes en micrómetros y se denomina L el número de pulsos láser para la generación de un daño respectivamente.

En base a los resultados de ensayo representados se puede verificar que para un paso de corte que sigue a la filamentación es especialmente conveniente ajustar los parámetros de proceso A y L de la filamentación respecto a la tensión de rotura σ_B para una separación a lo largo de la línea de separación y a la resistencia de borde σ_K de borde de separación obtenido tras la separación.

A continuación se puede verificar en especial el conocimiento de que ha demostrado ser especialmente conveniente ajustar la tensión de rotura σ_B para la separación a lo largo de la línea de separación menor que una primera tensión de referencia σ_{R1} dependiente del respectivo vidrio y la resistencia de borde σ_K de los bordes de separación obtenidos tras la separación mayor que una segunda tensión de referencia σ_{R2} dependiente del respectivo vidrio, en donde, a modo de ejemplo, ha demostrado ser especialmente ventajoso considerar $\sigma_{R1} = \sigma_{R2} = \sigma_{th}$, en donde σ_{th} es la tensión térmica máxima, que se puede suponer, por ejemplo, como $\sigma_{th} = 0,5 \cdot \alpha \cdot E \cdot (T_g - 100^\circ\text{C})$.

En las Figs. 1 a 3, para la tensión térmica máxima determinada de este modo para el respectivo vidrio se ha calculado $0,5 \cdot \alpha \cdot E \cdot (T_g - 100^\circ\text{C})$ y se traza como línea horizontal.

Se ha demostrado que este valor para los tres vidrios, es decir, SCHOTT AF32® (Fig. 1), SCHOTT D263® (Fig. 2) y SCHOTT BOROFLOAT® 33 (Fig. 3), se sitúa en el orden de magnitud de las tensiones de rotura σ_B y las resistencias de borde σ_K medidas y, por lo tanto, se da la posibilidad de seleccionar los parámetros de proceso A y L de manera optimizada a este valor.

De los resultados de ensayo representados en la Fig. 1, que se refieren a vidrio SCHOTT AF32®, se puede observar que en especial es apropiada una distancia de daños de 7 μm en combinación con un número de pulsos láser de 8, en especial para minimizar la tensión de rotura σ_B y por otro lado maximizar las resistencias de borde σ_K en relación con el valor $0,5 \cdot \alpha \cdot E \cdot (T_g - 100^\circ\text{C})$.

Para el vidrio SCHOTT D263®, de la Fig. 2 se puede extraer que una distancia de daños de 7 μm en combinación con un número de pulsos láser de 2 son parámetros especialmente apropiados.

De la Fig. 3 se puede extraer, para el vidrio SCHOTT BOROFLOAT® 33, que la combinación de número de pulsos 4 y la distancia de daños 7 μm , o bien la combinación de número de pulsos 8 y la distancia de daños 5 μm o 7 μm representan parámetros especialmente apropiados.

Por consiguiente, mediante la optimización de filamentos respecto a tensión de rotura, el siguiente proceso de separación (paso de corte) se puede realizar de manera optimizada mediante tensiones inducidas térmicamente.

Los ensayos muestran en especial que, sorprendentemente, las perforaciones con mayor distancia conllevan ventajas en la separabilidad en términos de material.

Entre estas cuenta una mayor seguridad de proceso: Incluso en ventanas de proceso de valor límite, es decir, procesos con intervalos de parámetros que hasta el momento no se pudieron realizar de manera segura por el estado de la técnica, con el procedimiento según la invención se pueden separar de manera segura.

Además, el láser se puede hacer funcionar con potencia reducida y/o la velocidad de desplazamiento (velocidad de avance) del láser se puede adaptar, en especial aumentar. De este modo, por ejemplo en materiales con una distancia de perforación de 5 μm con un ajuste de proceso con avance de 40 mm/s, se pudo reducir la potencia de láser de 110 W a 75 W.

En un ejemplo de aplicación se filamentó una muestra de SCHOTT BOROFLOAT® 33, 1 mm de grosor, CTE de $3,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, con 7 μm de distancia de daños y 6 pulsos láser para la generación de un daño respectivamente con 300 kHz y una velocidad de avance de 2100 mm/s.

Respecto a la conformación de borde de separación se produce otra ventaja. Debido a una menor tensión en el paso de corte se pueden producir geometrías más complejas, a modo de ejemplo radios angulares menores.

Además, se puede mejorar la calidad de borde. Se evitan astillas en el borde, o bien microgrietas, o bien estas no son perceptibles visualmente ni al microscopio. En especial, esto tiene un efecto positivo también sobre la resistencia de borde.

En la Fig. 4 se representa como ejemplo la rugosidad de borde para SCHOTT BOROFLOAT® 33 con 1 mm de grosor para diferentes parámetros de proceso. El número de pulsos láser L se denomina ráfaga en esta ilustración. Se desprende que la rugosidad de borde con el mismo número de pulsos láser desciende con distancia de daños creciente.

En las siguientes tablas se enumeran en detalle propiedades de los vidrios Schott citados anteriormente en el texto AF32®, D263® y BOROFLOAT® 33.

Tabla 1: Propiedades de SCHOTT AF32®:

Datos técnicos:	
Dimensiones:	Formatos de oblea redondos y cuadrados a medida, por ejemplo 6", 8" o 12"
Rugosidad superficial	< 1 nm RMS
Grosos	0,03 mm hasta 1,1 mm
Grosos estándar	0,3 mm, 0,4 mm
Transmitancia lumínica T_{065} ($d = 0,5 \text{ mm}$)	91,9 %
Coefficiente de expansión térmica lineal α (20 °C; 300 °C) (medición estática)	$3,2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$

Datos técnicos:	
Temperatura de transformación T _g	717 °C
Constante dieléctrica ϵ_r a 1MHz	5,1
Índice de refracción n _D	1,5099
Densidad ρ (recocido a 40 °C/h)	2,43 g/cm ³

El módulo de elasticidad de SCHOTT AF32® se estima en 74,8 kN/mm².

5 Tabla 2: Propiedades del vidrio SCHOTT D263®:

Datos técnicos:	
Dimensiones:	440 mm x 360 mm, otro tamaño a demanda
Rugosidad superficial	< 1 nm RMS
Grososores	0,03 mm hasta 1,1 mm
Grososores estándar y unidades de empaquetamiento	0,21 mm 100 pcs
	0,30 mm 100 pcs
	0,40 mm 50 pcs
	0,55 mm 50pcs
Transmitancia lumínica T _{n065} (d = 0,5 mm)	91,7 %
Coefficiente de expansión térmica lineal α (20 °C; 300 °C) (medición estática)	$7,2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$
Temperatura de transformación T _g	557 °C
Constante dieléctrica ϵ_r a 1MHz	6,7
Índice de refracción n _D	1,5230
Densidad ρ (recocido a 40 °C/h)	2,51 g/cm ³

El módulo de elasticidad de SCHOTT D263® se estima en 72,9 kN/mm².

Tabla 3: propiedades de SCHOTT BOROFLOAT® 33:

Coefficiente de expansión térmica lineal (C.T.E.)	$\alpha_{(20/300\text{ °C})}$	$3,25 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (según ISO 7991)	
Capacidad térmica específica	$c_{(20/300\text{ °C})}$	$0,83 \text{ KJ x (kg x K)}^{-1}$	
Conductividad térmica	$\lambda_{(90\text{ °C})}$	$1,2 \text{ W x (m x K)}^{-1}$	
Viscosidad η			
Punto de trabajo	10^4	dPas	1270 °C
Punto de reblandecimiento	$10^{7,5}$	dPas	820 °C
Punto de recocido	10^{13}	dPas	560 °C
Punto de deformación	$10^{14,5}$	dPas	518 °C
Temperatura de transformación (T _g)			525 °C

10

El módulo de elasticidad de SCHOTT BOROFLOAT® 33 se estima en 64 kN/mm².

15

El problema de que una grieta no siga una línea de separación prevista y se desgarre o que de la grieta no comience, o bien se rompa, se plantea de manera agravada cuando están previstas líneas de separación que se cruzan. En la separación de sustratos con líneas de separación dispuestas angularmente entre sí y constituidas por filamentos mediante tensión inducida térmicamente, en los puntos de cruce de las líneas de separación se produce

frecuentemente el problema de que el agrietamiento discurre potencialmente en todas las direcciones. Si las líneas de separación sirven como preparación de rotura en el ámbito del proceso de varias capas (por ejemplo con los pasos intermedios lavado, revestimiento, ...) para la posterior rotura, o bien separación en varias piezas parciales, el sustrato preparado de este modo está provisto de grietas iniciales en los puntos de cruce de las líneas de separación. En este caso, también las líneas de separación que se deben separar justo a continuación (por ejemplo tras otros pasos de proceso como lavado o revestimiento), están provistas de un agrietamiento inicial. De este modo, aumenta el riesgo de que la línea de separación se rompa de manera incontrolada en los procesos de procesamiento posterior.

Generalmente, también en este caso, debido a la tensión de rotura ajustada exactamente, la invención es especialmente apropiada para posibilitar una separación a lo largo de una línea prevista, también cuando esta se cruce con otra línea de separación con daños distanciados entre sí. Por lo tanto, según un perfeccionamiento de la invención está previsto que la pieza de trabajo procesada según la invención presente al menos dos líneas de separación que se cruzan con daños distanciados entre sí, o bien que se generen al menos dos líneas de separación que se cruzan con daños distanciados entre sí en el sustrato.

En el caso de líneas de separación que se cruzan es ventajoso dotar la pieza de trabajo de diferentes líneas de separación, que se pueden separar con diferentes tensiones elevadas.

Por lo tanto, generalmente, sin limitación a ejemplos de realización especiales, según otro aspecto de la invención, está prevista una pieza de trabajo, en especial un producto de vidrio, un producto vitrocerámico y/o un producto de silicio, que está dañado previamente a lo largo de al menos dos líneas de separación que se cruzan, de modo que la pieza de trabajo se puede descomponer ejerciendo una tensión de rotura a lo largo de las líneas de separación, en donde las tensiones de rotura para la descomposición en las líneas de separación o modificación se diferencian en al menos 3 MPa, preferentemente al menos 5 MPa, de modo especialmente preferente al menos 10 MPa.

En este caso, es especialmente conveniente que la estructura principal de las líneas de separación, que se deben separar en primer lugar, presenten una tensión claramente más reducida que las líneas de separación que se deben separar justo a continuación.

Generalmente es preferente que la pieza de trabajo presente a su vez daños distanciados entre sí a lo largo de la línea de separación, en donde la tensión de rotura σ_B , para la separación de la pieza de trabajo a lo largo de la línea de separación, es menor que la primera tensión de referencia σ_{R1} dependiente de la respectiva pieza de trabajo y por que la resistencia de borde σ_K de borde de separación obtenido tras la separación es mayor que una segunda tensión de referencia σ_{R2} dependiente de la respectiva pieza de trabajo. La tensión de rotura de las otras líneas de separación es correspondientemente al menos 3 Mpa más elevada o también más reducida. De modo especialmente preferente, esta segunda tensión de rotura es más elevada.

Las diferentes tensiones de rotura se pueden ajustar preferentemente mediante modificación de los parámetros de láser para que todas las características aquí descritas de las líneas de separación producidas con láser de pulso ultracorto también se consideren para esta forma de realización con líneas de separación que se cruzan. No obstante, también es concebible producir de otro modo daños a lo largo de líneas de separación que se cruzan. Por lo tanto, esta forma de realización de la invención no es necesaria en la introducción de daños en forma de filamento o en el procesamiento por láser.

La Fig. 5 muestra una pieza de trabajo o un sustrato 1, que presenta dos líneas de separación 3, 5 como se describió anteriormente. De modo preferente, sin limitación al ejemplo representado, el sustrato 1 tiene generalmente forma de placa y presenta correspondientemente dos áreas laterales 10, 11 opuestas, que discurren en general paralelamente entre sí. Con el procedimiento descrito se insertaron daños en forma de filamento 7 en el sustrato 1 por medio de un láser de pulso ultracorto. En este caso, la luz láser se irradia en una de las áreas laterales 10, 11, de modo que los daños en forma de filamento 7 se extienden siguiendo la dirección del rayo entre ambas áreas laterales 10, 11. En el ejemplo representado, las líneas de separación 3, 5 se cruzan en ángulo recto, como es preferente, para separar partes rectangulares.

Como se puede observar por medio de la Fig. 5, las distancias a_1 , a_2 de los daños en forma de filamento 7 a lo largo de las líneas de separación 3, 5 se diferencian. En el ejemplo representado, la distancia a_1 de daños en forma de filamento a lo largo de la línea de separación 3 es menor que la distancia a_2 de los daños en forma de filamento a lo largo de la línea de separación 5. De este modo, también la tensión de rotura σ_{B1} para una separación en la línea de separación 3 es diferente que la tensión de rotura σ_{B2} para la separación en la línea de separación 5. Correspondientemente a la observación explicada anteriormente, la tensión de rotura para la línea de separación 3 a través de la distancia a_1 menor puede ser más elevada o también más reducida. Típicamente se observa un mínimo de tensión de rotura a una distancia de filamentación en el intervalo de 5 a 7 μm . Por lo tanto, sin limitación al ejemplo representado, generalmente está prevista una pieza de trabajo, o bien un sustrato 1, en el que las distancias de daños en forma de filamento se diferencian, en donde las distancias en una de las líneas de separación 3 son menores que en la otra de las líneas de separación que se cruzan.

En otra forma de realización, la pieza de trabajo o el sustrato 1 está caracterizado por al menos dos líneas de separación diferentes como se representa en la Fig. 5, en donde la tensión de rotura σ_{B1} para la separación de la pieza de trabajo 1 a lo largo de una línea de separación 3 es menor que una primera tensión de referencia σ_{R1} dependiente de la respectiva pieza de trabajo, en donde la resistencia de borde σ_K de borde de separación obtenido tras la separación es mayor que una segunda tensión de referencia σ_{R2} dependiente de la respectiva pieza de trabajo, y en donde la segunda línea de separación 5 presenta una tensión de rotura significativamente más elevada de al menos $\sigma_{B1} + 5\text{MPa}$, preferentemente $\sigma_{B1}+10\text{ MPa}$, preferentemente $\sigma_{B1}+15\text{MPa}$. Preferentemente, la segunda línea de separación está pronunciada de tal manera que su correspondiente tensión de rotura se sitúa por encima de σ_{R1} .

En otra forma de realización, el sustrato está provisto de una variedad de líneas de separación para la posterior separación, en donde se generan líneas de separación de la misma dirección también con los mismos parámetros de proceso de láser y, por lo tanto, estas presentan las mismas tensiones de rotura y solo se presentan tensiones de rotura diferentes entre líneas de separación de diferente dirección. En otras palabras, están previstas más de dos líneas de separación que se cruzan entre sí, en donde la cantidad de líneas de separación se pueden subdividir en al menos dos grupos de líneas de separación que discurren en yuxtaposición, en donde la fuerza de rotura media de las líneas de separación de un grupo diverge de la fuerza de rotura media de otro grupo en el valor de al menos 3 MPa citado anteriormente. La Fig. 6 muestra un ejemplo de tal pieza de trabajo o sustrato 1. Varias líneas de separación 3 discurren paralelamente entre sí y de este modo en yuxtaposición a lo largo del área lateral 10. Estas líneas de separación 3 se cruzan con líneas de separación 5 asimismo paralelas entre sí. Como en el ejemplo mostrado en la Fig. 5, las líneas de separación 3, 5 se cruzan en ángulo recto. La cantidad de líneas de separación 3 que discurren paralelamente forma un primer grupo 30 de líneas de separación, las líneas de separación 5 que discurren perpendicularmente forman otro grupo 50. Los grupos 30, 50 se distinguen por que sus líneas de separación presentan daños en forma de filamento 7 con la misma distancia, pero con diferente distancia a una línea de separación del otro grupo. Por lo tanto, también las tensiones de rotura de las líneas de separación 3 del grupo 30 presentan un valor σ_{B1} que se diferencia del valor σ_{B2} de las líneas de separación 5 del otro grupo 50.

En principio, existen varias posibilidades de modificar, o bien ajustar la tensión de rotura a lo largo de una línea de separación. A modo de ejemplo, el número de pulsos de ráfaga que se utilizan para la formación del filamento se puede variar (en el intervalo 1-100 pulsos, preferentemente en el intervalo 2-20 pulsos). También se puede variar la energía de pulso del pulso individual o de ráfaga en el intervalo de 100 μJ a 1 mJ para pulsos individuales, o bien 400 μJ a 4 mJ en el caso de pulsos de ráfaga. Además, como se muestra en las figuras, la distancia de los filamentos 7 dentro de las líneas de separación 3, 5 individuales se puede variar a diferentes valores en el intervalo de 1 μm a 25 μm , de modo especialmente preferente en el intervalo de 2 μm a 20 μm , de modo que resultan diferentes valores de distancia a_1 y a_2 .

A modo de ejemplo, para un vidrio de aluminosilicato de boro alcalino de 0,5 mm de grosor se puede generar un sistema de líneas de separación de diferentes tensiones de rotura reduciéndose, mediante variación de la energía de ráfaga de 300 μJ a 400 μJ , la fuerza de rotura de 25 MPa a aproximadamente 15 MPa (con un láser UKP con tasa de repetición de 100 kHz y duración de pulso de 10 ps). Además, el aumento de la distancia de altura conduce a una disminución de la tensión de rotura necesaria para el proceso de separación en aproximadamente 5 MPa: En el caso de una altura de 5 μm entre las modificaciones introducidas, en un vidrio como el descrito anteriormente se produce una tensión de rotura de aproximadamente 45 MPa, mientras que la tensión de rotura en el caso de una distancia de 10 μm asciende solo a 15 MPa.

Tras la introducción de líneas de separación mediante un proceso de separación de dos pasos, el sustrato 1 se puede separar en primer lugar mediante rotura a lo largo de la primera, a continuación a lo largo de la segunda dirección mediante rotura. En este caso, los bordes adyacentes de las piezas parciales presentan diferentes estructuras periódicas distanciadas (mediante abertura del canal de filamentos en dos mitades de cilindro), que son accesibles a procedimientos de medición topológicos comunes, como perfilometría táctil u óptica o microscopía electrónica. En la Fig. 7 se representa un correspondiente elemento 2 separado de la pieza de trabajo 1.

Como se desprende de la representación esquemática, se proporciona un elemento de vidrio o vitrocerámico 2, que presenta dos áreas laterales 10, 11 opuestas, así como áreas de borde 13, 14, 15, 16, en donde al menos una de las áreas de borde 13, 14, 15, 16 presentan daños en forma de filamento 7, que discurren a distancia periódica en yuxtaposición en dirección de una de las áreas laterales 10, 11 a otra de las áreas laterales en el área de borde, en donde el periodo de la distancia de los daños en forma de filamento se diferencia en al menos dos de las áreas de borde 13, 14, 15, 16 entre sí.

También como en el ejemplo representado, es preferente una forma rectangular generalmente, de modo que el elemento 2 presenta dos pares de áreas de borde 13, 15 y 14, 16 opuestas. En este caso, el periodo de los daños en forma de filamento 7 es preferentemente igual en cada caso en un par de bordes opuestos. Respecto a los periodos, o bien distancias de daños en forma de filamento, el grosor del elemento 2 y su material se consideran en su totalidad correspondientes a los datos aquí divulgados respecto al procedimiento según la invención y a la pieza de trabajo producible con el mismo.

Sin limitación de la generalidad, la separación se puede realizar tanto mediante un proceso de rotura mecánico o un proceso de separación térmico basado en láser (por medio de láser de CO₂) u otros procedimientos.

En otra forma de realización, las tiras individuales (formadas mediante bordes opuestos de la misma tensión de rotura) permanecen unidas a través de una barra común, que se puede utilizar como ayuda de manipulación para subsiguientes pasos de proceso, como lavado, revestimiento y el posterior aislamiento. La Fig. 8 muestra un ejemplo de realización para tal pieza de trabajo 1. Como se desprende de la figura ejemplar, las líneas de separación 5 de uno de los grupos 50 terminan antes de uno de los bordes de la pieza de trabajo 1, de modo que se forma una barra 18 entre los extremos de las líneas de separación 5 y el borde 20 de la pieza de trabajo, en el que los elementos separables 2 permanecen fijados también cuando la pieza de trabajo 1 se separa en las líneas de separación 5 que terminan antes de borde 20.

En otra forma de realización, la pieza de trabajo 1 preparada para la separación presenta un borde circunferencial, a partir del cual se pueden romper tiras completas o piezas individuales en la separación. La Fig. 9 muestra esta forma de realización con un marco 22. En este caso, en el proceso de separación, el borde de manipulación se puede obtener como un todo o también descomponer gradualmente. Del mismo modo que la barra 18 de la forma de realización según la Fig. 8, las líneas de separación de uno de los grupos terminan antes de borde 20 de la pieza de trabajo 1. En el caso de un marco 22, esto se considera también para ambos grupos 30, 50.

Son asimismo concebibles otras variantes en las que las líneas de separación filamentosas, a modo de ejemplo, sobresalen parcialmente en el borde de manipulación o la tira de manipulación. La Fig. 10 muestra un ejemplo a tal efecto. En este ejemplo, se determina un lado del marco 22 mediante la distancia de los extremos de líneas de separación 5 al borde 20, mientras que los otros lados del marco se delimitan por los lados longitudinales de las líneas de separación 3, 5.

La Fig. 11 muestra un ejemplo para poder manipular una pieza de trabajo 1 según la invención, a modo de ejemplo para un procesamiento industrial posterior, y evitar en este caso una separación prematura en las líneas de separación 3, 5. En este ejemplo, la pieza de trabajo 1 está fijada a un soporte 24 con una de sus áreas laterales 11. A modo de ejemplo, el soporte 24 puede ser una oblea de vidrio o silicio o un polímero, o bien una placa de plástico.

En la forma de realización de la Fig. 6, las distancias de los daños en forma de filamento 7 y las tensiones de rotura son diferentes por grupos, en donde los grupos se forman mediante líneas de separación que discurren en yuxtaposición y no se cruzan. Esto no excluye dotar una o varias de las líneas de separación que discurren en yuxtaposición de una tensión de rotura diferente, en especial más reducida. De este modo, según otra forma de realización, el sustrato o la pieza de trabajo 1 se subdivide mediante elección apropiada de las tensiones de rotura en varias piezas de trabajo mayores, que se pueden dividir de nuevo en sí mismas. Esta subdivisión no debe ser una verdadera separación, sino que se debe entender en especial como subdivisión de la pieza de trabajo en las líneas de separación entre las piezas de trabajo. En el ejemplo mostrado en la Fig. 12, la pieza de trabajo 1 está subdividida en dos piezas parciales 8, 9 en una línea de separación 6.

A modo de ejemplo, solo cada n-ésima línea de separación paralela tiene la misma tensión de rotura y las líneas de separación intermedias tienen otro valor de tensión de rotura. En este caso, son posibles combinaciones arbitrarias de líneas de separación paralelas y perpendiculares a estas. La variación de las tensiones de rotura, como se menciona anteriormente, es posible mediante modificación de energía de pulso, número de ráfagas o distancia de modificaciones introducidas. Sería posible una subdivisión en la que la línea de separación presentara una tensión de rotura más elevada que las líneas de separación adyacentes en el límite entre las piezas parciales. Para posibilitar una separación primero en las piezas parciales 8, 9 y después de nuevo en elementos 2 individuales, es especialmente preferente ajustar una tensión de rotura para la(s) línea(s) de separación 6 menor que para las líneas de separación adyacentes dentro de las piezas parciales 8, 9. Por lo tanto, según esta forma de realización de la invención está previsto que la pieza de trabajo 1 presente varias líneas de separación 5, 6 que discurren en yuxtaposición, en donde al menos una de las líneas de separación 6 discurre entre dos líneas de separación 5 adyacentes, y en donde la línea de separación que discurre entre ambas líneas de separación 5 adyacentes presenta una tensión de rotura más reducida que las líneas de separación 5 adyacentes. Preferentemente, como en el ejemplo mostrado, a ambos lados de la línea de separación 6 con la menor tensión de rotura discurren dos grupos de líneas de separación 5 con tensión de rotura más elevada. La diferencia de tensiones de rotura se puede elegir en general del mismo modo que en las formas de realización con líneas de separación que se cruzan, es decir, preferentemente al menos 3 MPa, en especial al menos 5 MPa.

Todas las piezas de trabajo aquí descritas también pueden ser sustratos revestidos en principio. En este caso, el revestimiento también se puede aplicar antes de la inserción asistida por láser de líneas de separación. Según una forma de realización de la invención, como revestimiento se puede aplicar un revestimiento funcional orgánico para análisis proteico o de ADN. De este modo, la pieza de trabajo 1 o un elemento 2 separable de la pieza de trabajo 1 se puede utilizar como micromatriz de ADN o proteica. Son revestimientos apropiados aminosilanos, epoxisilanos, aldehidosilanos, hidrogeles, estreptavidina, así como determinados polímeros. El revestimiento puede estar provisto entonces de una micromatriz de oligonucleótidos, ADNc/PCR, BAC (Cromosomas Artificiales Bacterianos), péptidos,

proteínas, anticuerpos, glicanos o muestras celulares o tisulares. Las muestras se pueden preparar conjuntamente de este modo y analizar y/o enviar por separado tras la división.

Lista de signos de referencia:

5	1	Pieza de trabajo
	2	Elemento
10	3, 5, 6	Línea de separación
	7	Daño en forma de filamento
	8, 9	Pieza parcial de 1
15	10, 11	Áreas laterales de 1
	30, 50	Grupos de líneas de separación
20	13, 14, 15, 16	Área de borde
	18	Barra
	20	Borde de 1
25	22	Marco
	24	Soporte

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para la separación de un sustrato (1) de vidrio, vitrocerámica y/o silicio, en donde a lo largo de una línea de separación predeterminada con al menos un rayo láser pulsado se introducen
5 daños distanciados entre sí en el sustrato, en donde el material del sustrato es transparente para los pulsos láser, en donde tanto la distancia media entre daños adyacentes como el número de pulsos láser para la generación de un daño respectivamente se eligen de tal manera
que a) la tensión de rotura σ_B para la separación del sustrato (1) a lo largo de la línea de separación es menor que una primera tensión de referencia σ_{R1} dependiente del respectivo sustrato,
10 que b) la resistencia de borde σ_K de borde de separación obtenido tras la separación es mayor que una segunda tensión de referencia σ_{R2} dependiente del respectivo sustrato y
que c) el sustrato es separable a lo largo de la línea de separación tras la introducción de daños mediante acción de una tensión, y
en donde la primera y la segunda tensión de referencia $\sigma_{R1} = \sigma_{R2}$ son idénticas y están predeterminadas como una
15 tensión térmica máxima σ_{th} dependiente del material del sustrato o, en el caso de un sustrato pretensado química o térmicamente, como una tensión de tracción interna σ_{CT} definida por las propiedades del sustrato pretensado, en donde, en el primer caso, la tensión térmica máxima σ_{th} es determinable según la fórmula $\sigma_{th} = 0,5 \cdot \alpha \cdot E \cdot (T_g - 100^\circ C)$, en donde α designa los coeficientes de dilatación térmica del material del sustrato, E designa el módulo de elasticidad del material del sustrato y T_g designa la temperatura de transición vítrea del material del sustrato y en donde, en el segundo
20 caso, con un sustrato pretensado químicamente, la tensión de tracción interna σ_{CT} es determinable según la fórmula $\sigma_{CT} = (\sigma_{CS} \cdot d_L) / (d - 2d_L)$ o, en el caso de un sustrato pretensado térmicamente, es determinable según la fórmula $\sigma_{CT} = \sigma_{CS} / 2$, en donde σ_{CS} designa la tensión compresiva superficial del sustrato pretensado, d_L designa la profundidad de penetración de la tensión previa y d designa el grosor del sustrato, o
en donde para la primera tensión de referencia se considera $\sigma_{R1} \leq C_{R1} \cdot \alpha \cdot E \cdot (T_g - 100^\circ C)$ y para la segunda tensión de
25 referencia se considera $\sigma_{R2} \geq C_{R2} \cdot \alpha \cdot E \cdot (T_g - 100^\circ C)$, en donde C_{R1} y C_{R2} son coeficientes de tensión de referencia con $C_{R1} = 0,5/k$ y $C_{R2} = 0,5 \cdot k$ y $k = 1,5$, preferentemente $k = 2$, de modo especialmente preferente $k = 2,5$, y en donde α designa el coeficiente de dilatación térmica del material del sustrato, E designa el módulo de elasticidad del material del sustrato y T_g designa la temperatura de transición vítrea del material del sustrato.
- 30 2. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes, en donde, tras la introducción de daños, un punto de incidencia de una radiación láser, preferentemente de un láser de CO₂, sobre el sustrato se puede mover a lo largo de la línea de separación para provocar la tensión que actúa a lo largo de la línea de separación para la separación.
3. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes, en donde la distancia media entre daños adyacentes
35 se selecciona a partir del intervalo [1 μm , 10 μm], preferentemente se selecciona a partir del intervalo [3 μm , 8 μm], de modo especialmente preferente se selecciona a partir del intervalo [5 μm , 7 μm] y/o en donde el número de pulsos láser para la generación de un daño respectivamente se selecciona a partir del intervalo [1, 20], preferentemente se selecciona a partir del intervalo [1, 10], de modo especialmente preferente se selecciona a partir del intervalo [2, 8].
- 40 4. Pieza de trabajo de vidrio, vitrocerámica y/o silicio que está dañada previamente a lo largo de una línea de separación, **caracterizada**
porque la pieza de trabajo presenta daños distanciados entre sí a lo largo de la línea de separación y
porque la tensión de rotura σ_B para la separación de la pieza de trabajo a lo largo de la línea de separación es menor
que una primera tensión de referencia σ_{R1} dependiente de la respectiva pieza de trabajo y
45 **porque** la resistencia de borde σ_K de borde de separación obtenido tras la separación es mayor que una segunda tensión de referencia σ_{R2} dependiente de la respectiva pieza de trabajo,
en donde tanto la primera como la segunda tensión de referencia $\sigma_{R1} = \sigma_{R2}$ están predeterminadas como una tensión
térmica máxima σ_{th} dependiente del material del sustrato o, en el caso de un sustrato pretensado química o
térmicamente, como una tensión de tracción interna σ_{CT} definida por las propiedades del sustrato pretensado, en
50 donde, en el primer caso, la tensión térmica máxima σ_{th} es determinable según la fórmula $\sigma_{th} = 0,5 \cdot \alpha \cdot E \cdot (T_g - 100^\circ C)$, en donde α designa los coeficientes de dilatación térmica del material del sustrato, E designa el módulo de elasticidad del material del sustrato y T_g designa la temperatura de transición vítrea del material del sustrato y en donde, en el segundo
caso, con un sustrato pretensado químicamente, la tensión de tracción interna σ_{CT} es determinable según la fórmula
 $\sigma_{CT} = (\sigma_{CS} \cdot d_L) / (d - 2d_L)$ o, en el caso de un sustrato pretensado térmicamente, es determinable según la fórmula $\sigma_{CT} =$
55 $\sigma_{CS} / 2$, en donde σ_{CS} designa la tensión compresiva superficial del sustrato pretensado, d_L designa la profundidad de penetración de la tensión previa y d designa el grosor del sustrato, o
en donde para la primera tensión de referencia se considera $\sigma_{R1} \leq C_{R1} \cdot \alpha \cdot E \cdot (T_g - 100^\circ C)$ y para la segunda tensión de
referencia se considera $\sigma_{R2} \geq C_{R2} \cdot \alpha \cdot E \cdot (T_g - 100^\circ C)$, en donde C_{R1} y C_{R2} son coeficientes de tensión de referencia con
 $C_{R1} = 0,5/k$ y $C_{R2} = 0,5 \cdot k$ y $k = 1,5$, preferentemente $k = 2$, de modo especialmente preferente $k = 2,5$, y en donde α designa
60 el coeficiente de dilatación térmica del material de la pieza de trabajo, E designa el módulo de elasticidad del material de la pieza de trabajo y T_g designa la temperatura de transición vítrea del material de la pieza de trabajo.
5. Pieza de trabajo según la reivindicación 4, **caracterizada por que** la pieza de trabajo presenta al menos dos líneas
de separación (3, 5) que se cruzan entre sí con daños (7) distanciados entre sí.

6. Pieza de trabajo según la reivindicación precedente, en donde las tensiones de rotura para la división en las líneas de separación se diferencian en al menos 3 MPa, preferentemente al menos 5 MPa, de modo especialmente preferente al menos 10 MPa.
- 5 7. Pieza de trabajo según una de las reivindicaciones precedentes, en la que las distancias de daños (7) en forma de filamento se diferencian, en donde en una de las líneas de separación (3), las distancias son menores que en las otras líneas de separación (3, 5) que se cruzan entre sí.
- 10 8. Pieza de trabajo según una de las tres reivindicaciones anteriores con más de dos líneas de separación que se cruzan, en donde la cantidad de líneas de separación se puede subdividir en al menos dos grupos (30, 50) de líneas de separación (3, 5) que discurren en yuxtaposición, en donde la fuerza de rotura media de las líneas de separación de un grupo difiere de la fuerza de rotura media de otro grupo en al menos 3 MPa.
- 15 9. Pieza de trabajo según la reivindicación precedente, **caracterizado por que** las líneas de separación (5) de uno de los grupos (50) terminan antes de uno de los bordes de la pieza de trabajo (1), de modo que se forma una barra (18) o marco (22) entre los extremos de las líneas de separación (5) y el borde (20) de la pieza de trabajo (1), en el que los elementos separables (2) permanecen fijados también cuando la pieza de trabajo (1) se separa en las líneas de separación (5) que terminan antes de borde (20).
- 20 10. Pieza de trabajo (1) según una de las reivindicaciones 4 a 9, formada como sustrato revestido, preferentemente revestida con un revestimiento funcional orgánico para análisis proteico o de ADN.

Fig. 1

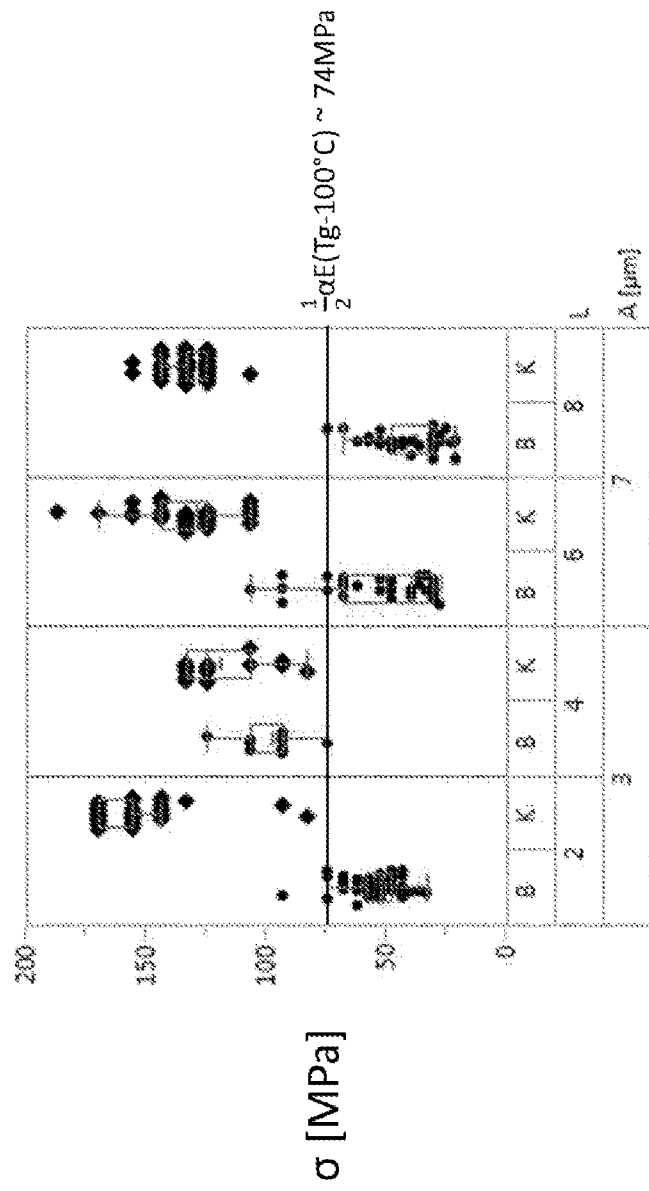


Fig. 2

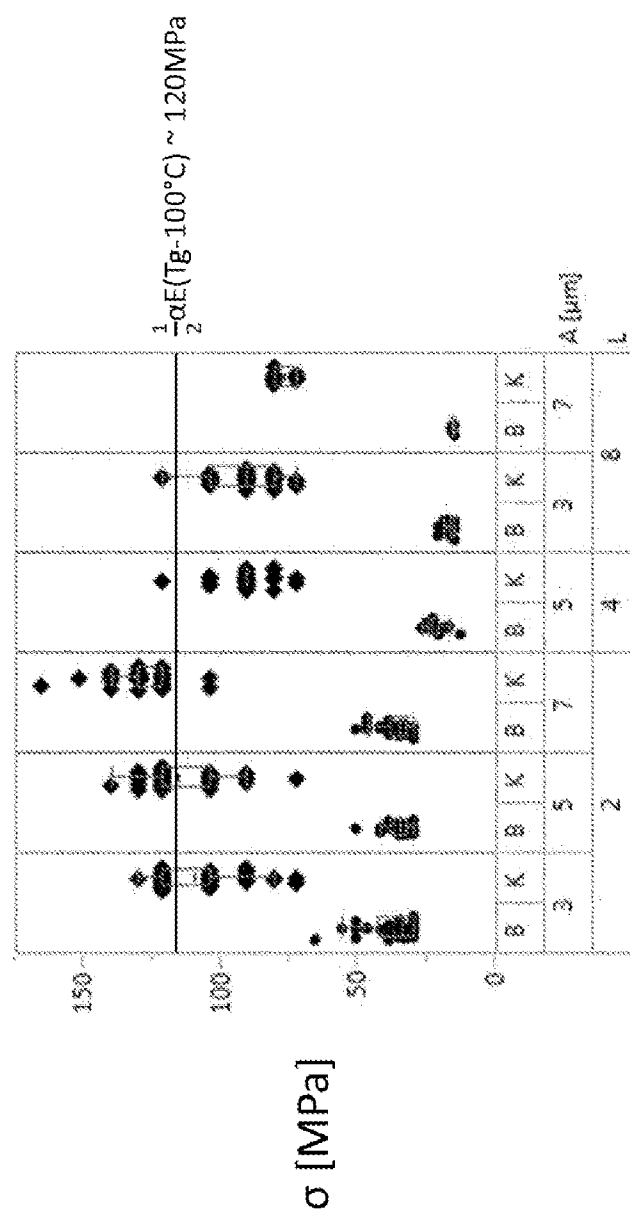


Fig. 3

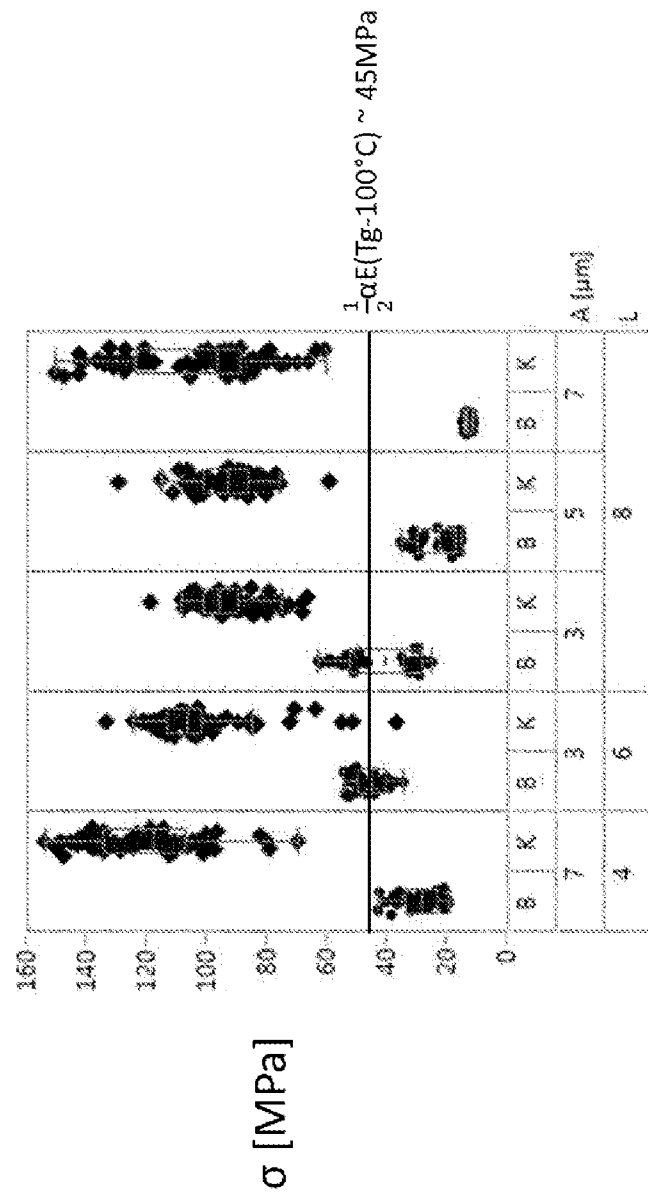


Fig. 4

1mm BOROFLOAT® 33

