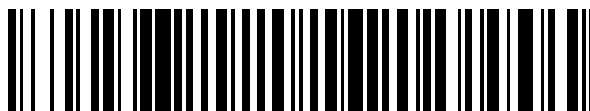


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 418 142**

51 Int. Cl.:

B81C 1/00 (2006.01)

H01L 21/78 (2006.01)

H01L 21/304 (2006.01)

B28D 1/22 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.12.2009 E 09807540 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.04.2013 EP 2379440**

54 Título: **Procedimiento para producir capas independientes delgadas de materiales en estado sólido con superficies estructuradas**

30 Prioridad:

23.12.2008 US 140466 P

04.05.2009 US 175447 P

06.05.2009 US 176105 P

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

12.08.2013

73 Titular/es:

**SILTECTRA GMBH (100.0%)
Manfred-von-Ardenne-Ring 20
01099 Dresden, DE**

72 Inventor/es:

LICHTENSTEIGER, LUKAS

74 Agente/Representante:

CURELL AGUILÁ, Mireia

ES 2 418 142 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 producir capas independientes delgadas de materiales en estado sólido con superficies estructuradas.

5

Campo de la invención

La presente invención se refiere a la producción de capas de material en estado sólido, y en particular, a técnicas para producir capas independientes, relativamente delgadas de materiales en estado sólido tal como materiales microelectrónicos. La presente invención también se refiere a técnicas para crear estructuras geométricas en las superficies de estas capas.

10

Descripción de la técnica relacionada

Típicamente, la fabricación de dispositivos microelectrónicos incluye dos grupos distintos de etapas de procesamiento: primero, se corta una capa independiente relativamente delgada de un bloque más grande de material en estado sólido (por ejemplo, un material semiconductor tal como silicio), y segundo, se usan una variedad de técnicas y etapas adicionales de procesamiento para formar estructuras en esta capa independiente, en particular en su superficie. Frecuentemente estas estructuras de superficie no comprenden ningún material adicional sino más bien se crean sólo al formar el material en la superficie de la capa independiente, por ejemplo, por grabado.

20

Como un ejemplo, en el primer grupo de etapas de procesamiento, se puede cortar una oblea delgada a partir de un lingote de silicio monocristalino (por ejemplo, usando una sierra de alambre). La superficie de oblea entonces se procesa adicionalmente (por ejemplo, por pulido) para obtener una superficie lisa. En un segundo grupo de etapas de procesamiento se forman entonces estructuras geométricas tal como zanjas, pirámides, mesetas, agujas, etcétera, en la superficie de la oblea. Esto se logra a través de una secuencia (usualmente complicada y costosa) de etapas, tal como depósitos de una máscara, modelado de la máscara (por ejemplo, por fotolitografía), modelado de la superficie subyacente de la oblea, tal como por grabado anisotrópico seco (por ejemplo, RIE) o húmedo (por ejemplo, KOH) o isotrópico (por ejemplo, basado en HF), y finalmente remoción de la máscara. Se pueden usar estructuras formadas en la superficie de una oblea, por ejemplo, para mejorar la eficiencia de conversión de luz a electricidad de celdas solares, por ejemplo, al crear estructuras aleatorias de pirámide invertida en la superficie de la oblea, lo que mejora la dispersión de luz en el área activa de la celda solar. En este caso simple, no se puede requerir una máscara, y puede ser suficiente una etapa individual de grabado (por ejemplo, por grabado húmedo con NaOH). En un ejemplo más complejo, se pueden crear estructuras tal como "cristales fotónicos" en la superficie de la oblea, facilitando la modificación de las características electroópticas del material de oblea (en particular, la banda prohibida). Puesto que es necesario controlar la disposición local de estructuras de forma precisa en estas aplicaciones, típicamente las técnicas están mucho más comprendidas en términos de requisitos de procesamiento (por ejemplo, máscara de alta calidad y grabado de RIE) de esta manera muy costosas. Otras aplicaciones incluyen sistemas microelectromecánicos donde la creación de estructuras (por ejemplo, zanjas, mesetas) en la superficie de una oblea representa frecuentemente una etapa (o etapas) temprana en la producción de dispositivos tridimensionales complicados tal como sensores y accionadores.

25

30

35

40

Una desventaja general de los procedimientos actuales para producir capas independientes, delgadas de materiales en estado sólido con superficies estructuradas es el gran número de etapas de procesamiento que requieren típicamente, tanto para producir la capa independiente misma, y luego subsiguientemente para estructurar su superficie. Esto hace a estas técnicas costosas y lentas, particularmente donde la disposición local de las estructuras de superficie se debe controlar, obligando al uso de una máscara y procesamiento litográfico. Un problema adicional es el consumo del material en estado sólido; por ejemplo, cuando se cortan obleas delgadas de un lingote usando sierras de alambre, se pierde aproximadamente 50 % del material de lingote llamado "pérdida kerf" (serrín, etc.). Adicionalmente, se pierde material cuando se pulen las obleas, y también subsiguientemente en las etapas de formación de la estructura tal como el grabado. Puesto que frecuentemente el material en estado sólido es costoso, esto se añade significativamente a los costes de producción. Adicionalmente, aunque para la mayoría de las aplicaciones es suficiente una capa muy delgada de material en estado sólido (en realidad frecuentemente es más favorable en términos de, por ejemplo, propiedades electrónicas u ópticas) para producir los dispositivos deseados, la mayoría de los planteamientos actuales no puede producir de forma económica estas capas independientes delgadas de material en estado sólido.

45

50

55

Como técnica anterior es conocido a partir del artículo de Applied Physics A, Material Science & Processing, vol. 89, nº 1, "Stress-induced large-area lift-off of crystalline Si films" que es depositada una capa con un coeficiente de expansión térmica desadaptado con respecto a un sustrato. Al enfriar, la contracción diferencial induce un gran campo de esfuerzo que es liberado mediante la iniciación y la propagación de una fisura paralela a la superficie.

60

Recientemente, se han descrito procedimientos para producir capas independientes, delgadas de material en estado sólido con pérdida kerf mínima. Sin embargo, permanece la necesidad de crear estructuras localmente definibles en la superficie de estas capas independientes, delgadas de una manera controlable que sea más simple y más económica que los procedimientos actuales.

65

Breve resumen de la invención

De acuerdo con las formas de realización de la presente invención, se mejora la producción de capas independientes, delgadas de materiales en estado sólido con superficies estructuradas al combinar la producción de las capas con la producción anteriormente separada de las estructuras de superficie. Las formas de realización de la invención proporcionan un proceso individual, simple y barato que circunscribe la mayoría de las desventajas identificadas anteriormente. Las formas de realización de la invención pueden producir capas independientes, delgadas de materiales en estado sólido con espesor localmente controlable y patrones localmente definibles de estructuras de superficie.

En varias formas de realización, se producen capas independientes, delgadas de materiales en estado sólido con patrones localmente controlables de estructuras de superficie al inducir patrones de esfuerzo, tridimensionales, localmente controlables en el material en estado sólido. Por ejemplo, se pueden establecer esfuerzos localmente controlados en una capa auxiliar que se adhiere al material en estado sólido. La capa auxiliar se puede unir a una pieza de trabajo de material en estado sólido a través de una adhesión suficientemente fuerte. La capa auxiliar se prepara de una manera que permite que los esfuerzos localmente definidos de diferentes magnitudes se induzcan en las ubicaciones deseadas en esta capa. También incluye esfuerzos localmente definidos en la pieza de trabajo de adhesión.

Por ejemplo, la capa auxiliar puede consistir de un patrón de áreas algunas con un coeficiente relativamente alto de expansión térmica (CTE) y algunas (o el resto) con un CTE relativamente bajo. Si la capa auxiliar se adhiere a una pieza de trabajo cuyo CTE está más próximo al "CTE bajo" que el "CTE alto" de la capa auxiliar, y si la estructura compuesta (capa auxiliar - pieza de trabajo) se somete a un cambio de temperatura, entonces en aquellas áreas de la capa auxiliar que tienen CTE alto se inducirán mayores esfuerzos que en aquellas áreas con un CTE menor. También, esto inducirá patrones de esfuerzo, localmente definidos, directamente relacionados, en la pieza de trabajo de adhesión del material en estado sólido.

Por ejemplo, la capa auxiliar puede comprender un polímero caracterizado por un CTE (el "CTE alto") que es mayor de aproximadamente $50 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a temperatura ambiente. De manera preferente, el polímero se caracteriza por un CTE que es mayor que aproximadamente $100 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a temperatura ambiente, y de manera más preferente, el polímero se caracteriza por un CTE que es mayor que aproximadamente $200 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a temperatura ambiente. El polímero se puede modelar con áreas "huecas", es decir, áreas donde el material de polímero se extrae de forma local. Si el material se extrae a través del espesor completo de la capa auxiliar (un "orificio") entonces no se induce localmente esfuerzo en aquellas áreas de la capa auxiliar y el efecto resultante similar como si la capa auxiliar en estas áreas tuviera un CTE localmente diferente (el "CTE bajo") que es igual al CTE de la pieza de trabajo de adhesión (por ejemplo, para una pieza de trabajo de silicio el CTE es aproximadamente $3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a temperatura ambiente). Si estas áreas "huecas" sólo son hoyuelos (es decir, el material en la capa auxiliar se remueve localmente sólo hasta una cierta profundidad dentro de la capa auxiliar) entonces la magnitud del esfuerzo localmente inducido está entre el caso previo y el otro caso extremo cuando no se extrae material de la capa auxiliar. El efecto resultante entonces es similar como si la capa auxiliar en estas áreas tuviera un CTE localmente diferente (el "CTE bajo") que está entre el CTE de la pieza de trabajo subyacente y el CTE del material de la capa auxiliar no tratada (el "CTE alto").

En otro ejemplo, en lugar de extraer localmente el polímero, también es posible tratar localmente el polímero de forma física o química a fin de que, por ejemplo, se incremente localmente el grado de reticulación del polímero, que puede conducir, por ejemplo, a una disminución local en el CTE (de "CTE alto" a "CTE bajo"). La diferencia entre el "CTE alto" y "CTE bajo" que se requiere para obtener el efecto deseado para producir capas independientes, delgadas con superficies estructuradas de una pieza de trabajo de adhesión depende de las dimensiones deseadas de estas estructuras de superficie, el CTE de la pieza de trabajo de adhesión, y de otras propiedades mecánicas de la capa auxiliar y del material de la pieza de trabajo (en particular, su espesor y módulo de elasticidad). Por ejemplo, si la capa auxiliar comprende polidimetilsiloxano, o PDMS, que tiene un CTE de aproximadamente $300 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a temperatura ambiente en el estado no modelado, y la pieza de trabajo comprende silicio con un CTE de aproximadamente $3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, entonces el modelado de la capa auxiliar con áreas que tienen una diferencia de CTE de al menos 1 % en comparación con el resto de la capa auxiliar es suficiente para producir una superficie estructurada en la pieza de trabajo (por ejemplo, una capa auxiliar que comprende PDMS con áreas donde el CTE es $297 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a temperatura ambiente y otras áreas donde el CTE es $300 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a temperatura ambiente se puede usar para producir una superficie estructurada en una pieza de trabajo que comprende silicio).

En aún otro ejemplo, la capa auxiliar puede comprender un material (por ejemplo, un metal) caracterizado por un CTE que es diferente del CTE de la pieza de trabajo por un valor absoluto de al menos $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a temperatura ambiente. Por ejemplo, para una pieza de trabajo de silicio que tiene un CTE de aproximadamente $3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a temperatura ambiente, se puede usar una capa auxiliar que comprende aluminio que tiene un CTE de aproximadamente $24 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a temperatura ambiente, y la capa auxiliar se puede modelar al extraer localmente el aluminio (parcial o completamente a cualquier profundidad deseada dentro de la capa auxiliar).

- En aún otro ejemplo, se pueden usar propiedades locales del material diferente del CTE local para crear patrones o modelo de esfuerzo localmente controlable en la capa auxiliar, por ejemplo abultamiento local (ver a continuación). Además, otras propiedades locales del material en la capa auxiliar que no puedan necesariamente crear de forma activa patrones de esfuerzo en la capa auxiliar pero que puedan tener influencia en la evolución dinámica de esos patrones de esfuerzo se pueden modificar localmente a fin de producir estructuras de superficie localmente definidas en la pieza de trabajo, por ejemplo, un módulo de elasticidad (tal como el módulo de Young) se pueden modificar localmente en la capa auxiliar, por ejemplo, al cambiar localmente el grado de reticulación de un polímero en la capa auxiliar.
- Se pueden usar otros planteamientos para producir patrones de esfuerzo localmente controlables en la capa auxiliar, como se describe a continuación. A pesar de que mecanismo se use para producir patrones de esfuerzo localmente definidos en la capa auxiliar, esto induce patrones de esfuerzo, localmente definidos, directamente relacionados en la pieza de trabajo de adhesión del material en estado sólido.
- Bajo condiciones apropiadas, los patrones de esfuerzo mecánico conducen al desprendimiento de una capa delgada de la pieza de trabajo, sustancialmente en paralelo a la interfaz entre la pieza de trabajo y la capa auxiliar ("fraccionamiento"). También, bajo condiciones apropiadas, en la superficie de la capa delgada producida que estuvo previamente dentro de la pieza de trabajo, se forma un patrón de estructura de superficie, y este patrón o modelo se dicta por el patrón de esfuerzos locales en la capa auxiliar. Adicionalmente, al mismo tiempo, se forma un patrón o modelo de estructura de superficie en la superficie de la pieza de trabajo que llega a ser recién expuesto por el desprendimiento de la capa delgada y este patrón es sustancialmente la imagen en el espejo (de manera más precisa, el complemento tridimensional) del patrón formado en la superficie de la capa desprendida. El área de la capa delgada desprendida corresponde aproximadamente al área de la capa auxiliar. Cada una de las dos superficies modeladas formadas cuando la capa delgada se desprende de la pieza de trabajo se puede usar nuevamente, es decir, se puede aplicar otra capa auxiliar a la superficie recién expuesta de la pieza de trabajo o a la superficie recién expuesta de la capa desprendida. De esta manera, las formas de realización de la presente invención facilitan las operaciones repetidas de desprendimiento, la creación de capas adicionales con estructuras de superficie, ambas del resto de la pieza de trabajo y de una capa desprendida.
- Las formas de realización de la presente invención también se refieren a la producción de capas independientes, delgadas de materiales en estado sólido con superficies estructuradas de materiales semiconductores mono- o policristalinos. La presente invención se puede desplegar donde se deseen o sean deseables discos delgados de silicio mono- o policristalino (por ejemplo, debido a consideraciones de coste), y donde se van a modelar una o ambas superficies de estos discos delgados con estructuras de superficie que consisten del mismo material como los discos mismos. Las aplicaciones ventajosas incluyen la producción de celdas solares de silicio monocristalino, eficientes y efectivas en el coste que tienen estructuras de superficie que actúan sustancialmente como capas antirreflexivas o cristales fotónicos, o estructuras para dispositivos microelectromecánicos en sustratos delgados mecánicamente flexible. Por ejemplo, las formas de realización de la invención facilitan el desprendimiento, de una plancha plana de silicio monocristalino, de capas que tienen espesores de aproximadamente 50µm con superficies estructuradas. En estas capas delgadas de silicio, por ejemplo, la invención facilita la creación de características de estructura superficial que tiene dimensiones laterales que varían desde significativamente por debajo de un milímetro hasta varios centímetros. Las alturas de estas características (es decir, el espesor local de la capa delgada en la característica) se puede controlar desde cero (es decir, un orificio formado de manera correspondiente en la capa delgada) a por encima de varios cientos de micrómetros, dependiendo también de las dimensiones laterales de la característica. Además, cada una de estas características "macroscópicas" se puede proveer con una elección de patrones específicos de rugosidad superficial "microscópicas", donde estos patrones son modelos microscópicos consisten en, o incluyen estructuras sustancialmente periódicas tal como líneas, valles, bordes, etcétera, que tienen dimensiones verticales y laterales que varían desde por debajo de 100 nanómetros a por encima de varios micrómetros, y períodos espaciales que varían desde menos de nanómetros a varias decenas de micrómetros. Las dimensiones de las características tanto "macroscópicas" como "microscópicas" que se producen se pueden controlar a través de los patrones de esfuerzo localmente definidos en la capa auxiliar así como las propiedades mecánicas de la capa auxiliar.
- En general, los patrones de esfuerzo localmente definidos en el producto compuesto (capa auxiliar y pieza de trabajo de adhesión) que se requieren para producir capas independientes, delgadas de materiales en estado sólido con patrones localmente controlables de estructuras de superficie de acuerdo a las formas de realización de la invención se pueden crear al someter este producto compuesto a uno o más factores de activación externa (por ejemplo, un cambio en la temperatura). La activación externa puede crear patrones de esfuerzo localmente definidos por dos diferentes planteamientos: en un planteamiento, se puede usar una activación externa homogénea (por ejemplo, el producto compuesto completo se somete al mismo cambio de temperatura) pero la capa auxiliar es heterogénea, es decir, al menos una de sus propiedades de material varía dentro de la capa auxiliar de acuerdo a un patrón predefinido (por ejemplo, el CTE de la capa auxiliar se varía localmente de acuerdo al patrón). En un segundo planteamiento, se puede usar una capa auxiliar homogénea, pero la activación externa es heterogénea de acuerdo a un cierto patrón o modelo (por ejemplo, una capa auxiliar que tiene el mismo CTE en todas partes se enfría más fuertemente en ciertas ubicaciones predefinidas). Se pueden usar ambos planteamientos de forma individual o en combinación. Los esfuerzos se pueden crear de manera local por ejemplo por cambios de volumen local del material

de capa auxiliar. Esto se puede hacer usando elementos activos especiales (por ejemplo, al tener pequeños accionadores tal como elementos piezoeléctricos embebidos en el material de la capa auxiliar, y luego al accionar de manera selectiva un subconjunto de los mismos. O de manera más pasiva, usando las propiedades del material de la capa auxiliar, (por ejemplo, induciendo diferente expansión térmica en diferentes ubicaciones en a capa auxiliar).

5 También otras propiedades del material que tienen influencia en el patrón de esfuerzo en el producto compuesto (capa auxiliar-pieza de trabajo) se pueden modificar de forma local, en particular el espesor de la capa auxiliar y/o el módulo elástico de la capa auxiliar. Finalmente, también las propiedades del material que tienen influencia en la evolución dinámica del patrón de esfuerzo (por ejemplo, cuanto cambia el patrón de esfuerzo localmente durante la división de la capa delgada, por ejemplo, la dinámica de la propagación de la rajadura tal como oscilaciones de la

10 punta de la rajadura) se pueden modificar localmente, en particular el módulo elástico. Por ejemplo, se conoce que la dependencia no dimensional del módulo elástico de los sistemas bimateriales, para problemas del valor límite prescrito por tracción, se puede expresar en términos de dos parámetros bimateriales, Sigma, la relación de rigidez de los dos materiales, y épsilon, el índice oscilatorio. También se conoce que para un sistema bimaterial que consiste en una pieza de trabajo de un material y una capa auxiliar de un segundo material (tomando cada material que es isotrópico y linealmente elástico, con una rajadura semiinfinita preexistente en la pieza de trabajo paralela a la interfaz, y la pieza de trabajo y la capa auxiliar que se asumen infinitamente larga) la solución de estado estable para el problema de fraccionamiento (por ejemplo, el espesor de la capa delgada producida) depende sustancialmente del espesor de la capa auxiliar así como de la relación de rigidez Sigma, pero sólo débilmente del índice oscilatorio beta. Por lo tanto, en un ejemplo de una forma de realización de la presente invención, las variaciones localmente definidas y relativamente grandes en el espesor de la capa delgada producida se logran al variar localmente el espesor de la capa auxiliar y/o su rigidez. También, al variar localmente el índice oscilatorio se permite modificar las propiedades locales (por ejemplo, período o amplitud) de estructuras relativamente más pequeñas (en términos de la variación del espesor, es decir, de la amplitud), sustancialmente periódicas que se producen en la superficie de la capa delgadas por comportamiento oscilatorio en la punta de la rajadura.

25 Una ventaja principal de la invención reside en la reducción significativa del número de etapas de procesamiento requeridas para producir capas independientes, delgadas de materiales en estado sólido con superficies estructuradas. En contraste a los procedimientos tradicionales, los procesos para el corte de capas delgadas de una pieza más gruesa de material en estado sólido, y los procesos subsiguientes de formar estructuras de superficie, controlables, en estas capas (tal como pulido, limpieza, depósito de máscara, modelado de máscara, transferencia de patrón o modelo y grabado de superficie, remoción de máscara) se combinan todos en una secuencia de proceso individual, mucho más simple y significativamente menos costosa. Además, el presente planteamiento reduce de forma significativa la pérdida material que se presenta durante la producción de las capas independientes, delgadas de materiales en estado sólido con superficies estructuradas. En contraste a los procedimientos anteriores que emplean, por ejemplo, aserrado, molienda, pulido, o grabado, el presente planteamiento no incurre casi en pérdida de materia prima valiosa. Cuando se desprende una capa delgada modelada de una pieza de trabajo, la materia prima permanece casi completamente distribuida entre la capa desprendida y el resto de la pieza de trabajo, con los patrones o modelos de la estructura de superficie en la capa delgada y en la pieza de trabajo que son sustancialmente complementarios entre sí.

40 Otra ventaja de la invención es la capacidad de implementarla usando equipo significativamente menos costoso. Las formas de realización de la invención se pueden integrar fácilmente en los procedimientos existentes de producción, por ejemplo, para la producción de celdas solares, delgadas, de silicio, con superficies estructuradas.

45 Finalmente, una ventaja de la invención es que se puede aplicar a muchos tipos diferentes de materiales en estado sólido.

Breve descripción de las Figuras

50 La invención se pondrá más claramente de manifiesto a partir de la descripción de una forma de realización proporcionada a título de ejemplo ilustrada por las figuras, en las cuales:

La figura 1 ilustra esquemáticamente la secuencia de proceso del presente procedimiento en cuatro etapas (de parte superior a fondo), en vista en perspectiva;

La figura 2 ilustra esquemáticamente la secuencia de proceso del presente procedimiento en cuatro etapas (de la parte superior a fondo), en la vista en perspectiva;

La figura 3 ilustra esquemáticamente la secuencia del proceso del presente procedimiento en cuatro etapas (de la parte superior al fondo), en vista en perspectiva.

Descripción detallada de las posibles formas de realización de la Invención

65 La presente invención se refiere a un procedimiento para producir capas independientes, delgadas de materiales en estado sólido con superficies estructuradas. Haciendo referencia la figura 1 se describen las siguientes formas de realización ilustrativas de la invención.

En una primera forma de realización, la pieza 2 de trabajo es una oblea de silicio monocristalino, comercialmente disponible. La figura 1 representa esquemáticamente una secuencia representativa de proceso de acuerdo con la invención, en cuatro etapas (desde la parte superior al fondo), en vista en perspectiva. En adelante los números de referencia están con respecto a la figura 1.

Etapa 1: La materia prima básica es una oblea 2 de silicio monocristalino, producida de acuerdo con el procedimiento de Czochralski como se usa, por ejemplo, en la industria de microelectrónicos o fotovoltaicos. La oblea 2 tiene un diámetro de aproximadamente 76 mm y un espesor de aproximadamente 0,4 mm. La oblea está ligeramente n- o p-impurificada, tiene una resistividad eléctrica específica de aproximadamente 10 Ohm cm, y su dos caras 1a y 1b están orientadas paralelas a un plano cristalino $\langle 100 \rangle$. Una o ambas caras 1a y/o 1b de la oblea pueden estar pulidas tipo espejo o simplemente grabadas y plegadas. La lengüeta 2 se puede usar directamente de la producción de la oblea, o se puede prelimpiar más o menos usando procedimientos convencionales (por ejemplo, con solventes orgánicos y agua, o por limpieza por oxidación con plasma).

Etapa 2: En cada cara 1a y 1b de la oblea 2a, se aplica una capa delgada 3a, 3b de polidiorganosiloxano (por ejemplo, polidimetilsiloxano, o PDMS; los siguientes análisis se refieren a PDMS por conveniencia, pero se debe entender que se puede emplear cualquier copolímero o polímero de silicón adecuado) y se cura (o se deja curar). Los espesores preferidos de estas capas auxiliares 3a, 3b están entre 0,01 mm y 10 mm, con un espesor de entre aproximadamente 0,3 mm y aproximadamente 3 mm que es el más preferido. Los espesores de las dos capas 3a, 3b son los mismos en esta forma de realización ilustrativa, pero en otras formas de realización, puede diferir los espesores de las dos capas. Para el PDMS es posible usar, por ejemplo, SYLGARD 184 de Dow Corning, con una relación de mezclado de 1:10 entre el agente de curación y el material base. La mezcla de PDMS líquido se desgasifica primero durante aproximadamente una hora al vacío, luego se aplica en cada cara 1a, 1b de la oblea 2 en el espesor deseado, y se cura en una placa caliente (por ejemplo, durante 30 minutos a 100°C). En esta forma de realización ilustrativa, las capas 3a, 3b de PDMS tienen espesores homogéneos sobre la mayoría del área de la oblea. Esto se puede lograr al poner la oblea en una superficie horizontal y al dejar que el PDMS se equilibre por gravedad antes de curarlo. Después de que se cura el PDMS, el producto compuesto de tres capas (PDMS 3a - oblea 2 - PDMS 3b) se enfría hasta temperatura ambiente. Después de eso, cualquier saliente de PDMS a lo largo de la circunferencia de la oblea 2 se remueve con una cuchilla filosa, tal que el borde de la oblea 2 esté esencialmente libre de PDMS, y el PDMS cubra sólo las dos caras 1a, 1b de la oblea 2. Es posible evitar que cualquier PDMS sobresalga sobre la circunferencia de la oblea (y de esta manera toque el borde de la oblea) al aplicar el PDMS a las caras de la oblea cuidadosamente y dejándolo equilibrar en una superficie horizontal; de esta manera, la tensión superficial del PDMS impedirá que se derrame sobre los bordes de la oblea.

Etapa 3: Entonces, se realiza una etapa de modelado: una herramienta, tal como una cuchilla afilada o cuchilla de afeitar, se usa para cortar un patrón o modelo arbitrario 6 de líneas y/o otra figuras geométricas (tal como círculos, etc.) en la superficie de una a de la capas 3a de PDMS. En esta forma de realización, todos los cortes tienen la misma profundidad en la capa 3a de PDMS, que es menor que la capa 3a de PDMS (es decir, la capa 3a de PDMS no se corta en ningún lado completamente a través de la superficie 1a de a oblea). Por ejemplo para una capa 3a de PDMS que tiene un espesor preferido de 1 mm, las profundidades preferidas para estos cortes varían desde 0,01 mm a 0,99 mm, de manera más preferente de 0,1 mm a 0,9 mm.

Etapa 4: después de la etapa del modelado, el producto compuesto (PDMS 3a - oblea 2 - PDMS (3b)) se sumerge completamente en un baño de nitrógeno líquido (temperatura de aproximadamente -200°C). Debido a los fuertemente diferentes coeficientes de expansión térmica del silicio (aproximadamente $3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) y PDMS (aproximadamente $300 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), se inducen grandes esfuerzos mecánicos en el producto compuesto o este enfriamiento. Sin embargo, en áreas que son parte del patrón o modelo 6 donde la capa 3a de PDMS se ha cortado, los esfuerzos mecánicos son localmente diferentes, dependiendo de la disposición y las profundidades de los cortes. Después de unos pocos segundos de enfriamiento, la oblea 2 se divide espontáneamente, paralela a su superficie 1a, en dos discos 5 delgados de silicio monocristalino, con un lado de cada disco 5 que tiene aún la correspondiente capa 3a o 3b auxiliar de PDMS que se adhiere.

Con cuidado adecuado, cada uno de los dos discos 5 de silicio consiste esencialmente en una pieza individual, con la cara donde la división ocurrió que muestra una imagen 7a o 7b del patrón del modelo 6 en su superficie 4. Los patrones 7a y 7b de imagen en los dos discos 5 de silicio son sustancialmente complementarias. Las características o rasgos en cada uno de los patrones 7a y 7b de imagen pueden comprender áreas de diferente rugosidad superficial, diferentes altura superficiales (es decir, diferentes espesores locales del correspondiente disco 5 de silicio), u otras diferencias en las propiedades superficiales en comparación a las áreas circundantes. Las características laterales del patrón 6 se reproducen sustancialmente en las imágenes complementarias 7a y 7b, a la misma escala. Las características en el patrón 6 que tienen dimensiones laterales mayores de aproximadamente 0,1 mm se pueden reproducir en los patrones 7a y 7b de imagen. A fin de evitar ruptura adicional perpendicular a la superficie 4, los discos 5 se pueden transferir, después de la división, directamente del baño de nitrógeno líquido sobre una placa caliente a 100°C (con el lado que tiene la capa auxiliar 3a o 3b de PDMS adherido hacia abajo), hasta que se ha calentado a la capa auxiliar completa de PDMS nuevamente al menos a temperatura ambiente. No importa que procedimiento de calentamiento se emplee, se prefiere que los discos 5 se prensen cuidadosamente

contra un soporte plano conforme se calientan de modo que se invierta cualquier rizado de las capas, para aplanar las capas conforme prosigue el calentamiento.

5 Los discos 5 delgados de silicio con los patrones 7a y 7b de superficie producidos de acuerdo a este procedimiento consisten sustancialmente en silicio monocristalino con las mismas propiedades que la oblea original 2 y se pueden usar directamente. De manera alternativa, las capas auxiliares de 3a o 3b de PDMS también se pueden extraer de los discos 5 de silicio, por ejemplo por inmersión en un grabador líquido apropiado (por ejemplo, una mezcla 3:1 en volumen de NMP (N-metilpirrolidona) y TBAF/THF (fluoruro de tetrabutilamonio, solución 1,0M en tetrahidrofurano), o también por inmersión en ácido hidrofúrico). Una manera preferida para extraer las capas auxiliares 3a o 3b de PDMS es por enjuague con, o por inmersión en un baño de, grabador de ácido sulfúrico caliente (H_2SO_4), de manera preferente a una temperatura por encima de 150°C (y de manera más preferente por encima de 200°C), luego extraer mecánicamente la espuma de sílice blanca producida (por ejemplo, usando un cepillo, y posiblemente varios ciclos de cepillado-grabado), y limpiando finalmente el disco 5 de silicio por inmersión en ácido hidrofúrico.

15 En una segunda forma de realización ilustrativa, la etapa de modelado (etapa 3) se realiza usando irradiación con un haz láser en lugar de corte con una cuchilla filosa. El láser tiene de manera preferente una frecuencia que se absorbe fuertemente por PDMS (un láser de CO_2 cumple con este criterios), y de manera preferente la intensidad y el movimiento del haz sobre la capa 3a de PDMS se controla de una manera automatizada o manual para cortar un patrón o modelo deseado. Los cortadores láser comercialmente disponibles (por ejemplo, VERSA LASER VLS 6.60, con láser de CO_2 de 60 vatios) son aceptables. La profundidad del corte se puede variar de varias maneras que se pueden emplear de manera individual o en combinación; el haz láser se puede enfocar a diferentes profundidades, se puede variar la intensidad de láser, la velocidad de exploración del haz de láser sobre la superficie 3a de PDMS se puede variar, la velocidad de impulso de láser se puede cambiar, y el haz láser se puede hacer pasar sobre los mismos puntos en la superficie 3a de PDMS de forma repetida (posiblemente con etapas de limpieza superficial entre las pasadas).

30 En una tercera forma de realización, la etapa del modelado se realiza usando grabado químico en lugar de corte con una cuchilla filosa, posiblemente usando una capa de máscara en la superficie del PDMS, y posiblemente en combinación con corte con cuchilla o láser.

35 En una cuarta forma de realización, la etapa de modelado se realiza al quemar localmente la superficie 3a de PDMS en ubicaciones seleccionadas, pero en lugar de usar un haz láser, se presiona un sello caliente que presenta una forma en relieve del patrón o modelo deseado sobre la superficie 3a de PDMS. El sello caliente está preferentemente a una temperatura por encima de la temperatura de descomposición del PDMS, de manera más preferente por encima de 550°C.

40 En una quinta forma de realización, la etapa de modelado se realiza usando cualquiera de los varios mecanismos posibles de corte, tal como los mencionados anteriormente. Sin embargo, en este caso, no solo están las líneas cortadas en la superficie 3a de PDMS, sino también están características bidimensionales lateralmente extendidas tal como discos que también se imponen en la superficie 3a de PDMS. Esto se puede hacer, por ejemplo, al usar un láser de una manera de barrido para crear estas características en base a los datos de imagen usados para controlar el disparo de láser de la manera de un escáner.

45 En una sexta forma de realización, la etapa de modelado en el presente procedimiento se realiza usando cualquiera de varios mecanismos de corte, tal como los mencionados anteriormente. Sin embargo, la profundidad del corte no se mantiene constante a todo lo largo del patrón o modelo 6 sino más bien se varía de forma local de una manera predeterminada. En otras palabras, las características del patrón 6 se pueden dar a diferentes profundidades. De esta manera, por ejemplo, las características con alturas localmente diferentes se pueden producir en los patrones 7a y 7b de imagen. En un ejemplo extremo, se pueden realizar cortes en su totalidad a través de la capa 3a de PDMS sobre la superficie 1a de la oblea 2. Si esto se realiza, por ejemplo, para un patrón 6 que consiste de círculos rellenos (es decir, discos), uno de los dos discos 5 producidos tendrá un patrón o modelo 7a de imagen de orificios de paso, y el otro tendrá el patrón 7b complementario correspondiente de mesetas formadas con el mismo espesor como la oblea original 2.

55 En una séptima forma de realización, la etapa de modelado se realiza no al cortar patrones en la capa auxiliar 3a de PDMS, sino más bien al modificar localmente las propiedades de la capa 3a de PDMS en ciertas ubicaciones que corresponden a las características del patrón o modelo deseado. Por ejemplo, las propiedades mecánicas del PDMS, y en particular su CTE, se pueden modificar localmente usando la siguiente técnica [Huck et al., *Langmuir* (2000), 16:3497-3501]: La capa 3a de PDMS se remoja durante 5 horas en una solución 0,25 M de benzofenona en diclorometano. La capa 3a de PDMS entonces se seca durante 24 horas en aire, en la oscuridad. Este tratamiento incrementa la sensibilidad de PDMS a irradiación con luz ultravioleta (UV), puesto que la benzofenona, un fotosensibilizador, genera radicales en la irradiación; estos radicales reticulan el PDMS. La capa 3a de PDMS entonces se expone a irradiación UV (por ejemplo, 254 nm, 10-30 min) a través de una fotomáscara de amplitud que muestra el patrón modelo 6 deseado. Las regiones expuestas de la capa 3a de PDMS resultan más rígidas y menos elastoméricas, tienen un CTE y un módulo elástico que son diferentes de los de las áreas circundantes. En lugar de irradiar el PDMS sensibilizado con luz UV modelada por una máscara, el PDMS sensibilizado se puede exponer en

cambio, por ejemplo, usando un láser de UV. Además, la reticulación selectivamente mejorada del PDMS (que modifica localmente su CTE y otras propiedades mecánicas que pueden tener influencia en la generación del esfuerzo local) en ubicaciones que corresponden en las características de un patrón o modelo deseado se pueden lograr, por ejemplo, a través de irradiación con un láser infrarrojo que calienta selectivamente ciertos patrones o modelos en la superficie de la capa 3a de PDMS sin quemarlo.

En una octava forma de realización, la etapa de modelado se realiza no al cortar patrones en la capa auxiliar 3a de PDMS, sino más bien al modificar localmente las propiedades de la capa 3 de PDMS en ubicaciones que corresponden a las características del patrón deseado. Por ejemplo, las propiedades mecánicas del PDMS, y en particular su CTE y/o su módulo elástico, se pueden modificar localmente al embeber localmente otros materiales con diferentes propiedades (tal como diferente CTE y/o diferente módulo elástico). Cuentas de vidrio, burbujas de aire, partículas metálicas, fibras, etc., en la capa de PDMS.

En una novena forma de realización, la etapa del modelado se realiza al usar una capa auxiliar heterogénea 3a que comprende al menos una capa modeladas o grabada en patrones y al menos otra capa no modelada, posiblemente realizada en diferentes materiales, y posiblemente con diferentes propiedades (tal como diferentes CTE). En una implementación, antes de aplicar el PDMS, se deposita una estructura metálica con el patrón o modelo 6 en la superficie de la oblea 2, por ejemplo usando técnicas de impresión por estarcido o litografía y depósito de vapor físico. Entonces se aplica el PDMS tanto sobre esa estructura metálica como sobre la oblea (embebiendo de este modo parcialmente la estructura metálica), y entonces se cura. Puesto que las propiedades de la estructura metálica tal como el CTE son diferentes de aquellas del PDMS, los discos 5 delgados producidos tienen patrones 7a y 7b de estructura de superficie que son sustancialmente en las imágenes del patrón o modelo 6 de la estructura metálica.

En una décima forma de realización, el presente procedimiento se usa para dividir una oblea 2 en dos discos delgados 5, y el patrón 6 usado es un patrón simétrico en el espejo. Esto produce dos discos delgados 5 que tienen patrones 7a y 7b de imagen que son sustancialmente idénticos, es decir, dos productos ("dispositivos") idénticos se pueden producir "en una etapa", es decir, usando sólo una aplicación del presente procedimiento. Las propiedades de las capas auxiliares 3a y 3b de PDMS (por ejemplo, sus espesores) se pueden elegir tal que los espesores de los dos discos delgados producidos 5 son los mismos, o que pueden ser diferentes uno del otro.

En una undécima forma de realización, el presente procedimiento se usa con un cierto patrón 6 en la capa 3a de PDMS en un lado de la oblea, y el otro patrón 6' en la capa 3a de PDMS en el otro lado de la oblea. El patrón 6' puede ser el mismo como el patrón 6, o puede ser un patrón o modelo diferente. Los patrones 7a y 8b de imagen en los discos delgados 5 que se producen por el procedimiento de acuerdo a esta forma de realización entonces son sustancialmente combinaciones (por ejemplo, superposiciones) de los patrones 6 y 6'.

En una duodécima forma de realización, el presente procedimiento se usa primero con un cierto patrón o modelo 6 en la capa 3a de PDMS y/o un patrón 6' en la capa 3 de PDMS para producir dos discos delgados 5, uno que tiene un patrón 7a de imagen correspondiente y el otro un patrón 7b de imagen en espejo correspondiente en un lado. Cada uno de los dos discos 5 usualmente tiene aún una capa 3a o 3b de PDMS que se adhiere en el otro lado. Estas capas entonces se pueden reemplazar con capas frescas de PDMS, pero se prefiere dejar que estas capas 3a y 3b se adhieran a su respectivo disco 5. A pesar de si se reemplazan o se reutilizan, estas capas 3a y/o 3b entonces se pueden modelar, si se desea, o su patrón o modelo se puede modificar si ya se modelaron (con los patrones 6 o 6') durante la primera iteración del procedimiento (es decir, para producir los dos discos delgados 5). El procedimiento entonces se aplica nuevamente al depositar nuevas capas auxiliares de PDMS para la siguiente iteración en aquellos lados de los dos discos delgados 5 que no tienen aún una adhesión de capa de PDMS (es decir, los lados que tienen los patrones 7a o 7b de estructura de superficie). Ninguna, una o ambas de estas nuevas capas auxiliares de PDMS se pueden modelar, si se desea (con cualquier patrón o modelo deseado). La segunda iteración del procedimiento entonces produce un total de cuatro discos más delgados, donde dos de estos cuatro discos más delgados (en general) tienen patrones localmente controlables de estructuras de superficie en ambos lados, es decir, comparables a la impresión de doble lado: En un lado tiene un patrón 7a de imagen (o su imagen 7b de espejo, respectivamente) que corresponde a la superposición de los patrones 6 y 6' en las capas 3a y 3b auxiliares, anteriores de PDMS durante la primera iteración, y en el otro lado tienen un patrón o modelo de imagen que corresponde a una superposición de cualquier patrón (posiblemente modificado) en las capas 3a (ó 3b) auxiliares, anteriores de PDMS y cualquier patrón en la nueva capa auxiliar correspondiente de PDMS. De esta manera, se pueden producir capas independientes, delgadas de materiales en estado sólido con superficies estructuradas similares o diferentes en ambos lados. (El procedimiento de acuerdo a esta forma de realización produce al mismo tiempo también dos discos más delgados diferentes que sólo tiene estructuras de superficie en un lado, que corresponden a patrones de imagen de la segunda iteración). Se señala que las estructuras de superficie en los discos delgados 5 producidos durante la primera iteración pueden tener algo de influencia en los patrones de esfuerzo y de esta manera en las estructuras de superficie producidas durante la segunda iteración, sin embargo, esta influencia usualmente es pequeña, (puesto que el espesor de las estructuras de superficie producida usualmente es mucho más pequeño que el espesor de los discos) cualquiera también se puede compensar usando modelado apropiado de las capas auxiliares durante la segunda iteración.

En una decimotercera forma de realización, en lugar de tener un patrón 6 de regiones con CTE localmente

- diferentes en la capa 3a de PDMS y someter la estructura compuesta a un cambio de temperatura, también es posible emplear otros mecanismos para inducir esfuerzos localmente diferentes (es decir, un patrón o modelo de esfuerzo) en la capa 3a de PDMS. Por ejemplo, en lugar de usar el mismo cambio de temperatura para la capa auxiliar completa de PDMS, se pueden imponer diferentes cambios de temperatura en diferentes ubicaciones en la capa auxiliar de PDMS, por ejemplo, al enfriar selectivamente ciertas áreas en la capa auxiliar más fuertemente que otras, por ejemplo, usando contacto con un sello enfriado que tiene el patrón deseado 6 grabado en relieve, o al enfriar la capa entera y al re-calentar selectivamente ciertas áreas, por ejemplo, con un láser. De esta manera, es posible producir patrones o modelos de esfuerzos localmente diferentes usando aún una capa auxiliar homogénea de PDMS (para esta forma de realización se prefiere usar un material de capa auxiliar con conductividad térmica relativamente baja, tal como PDMS). De manera más general, se pueden producir modelos de esfuerzo localmente definibles al someter la capa auxiliar a los patrones 6 de condiciones físicas o químicas localmente variables, externamente aplicadas (que adicionalmente también se pueden variar de manera temporal), por ejemplo, patrones o modelos de luz, patrones o modelos de calor (diferentes áreas que tiene diferente temperatura), patrones de solvente (diferentes áreas que tienen diferentes concentraciones de solvente), patrones de campos eléctricos o magnéticos, patrones o modelos de fuerzas mecánicas externas que actúan en la capa auxiliar, etc. La capa auxiliar comprende de manera preferente al menos un material que interactúa con estos patrones 6 de las condiciones físicas o químicas externamente aplicadas al cambiar (localmente) su volumen (por ejemplo, un material que se expande bajo luz UV, o en un campo eléctrico/magnético, etc.).
- En una decimocuarta forma de realización, otro procedimiento alternativo para inducir patrones de esfuerzos localmente diferentes es incluir dispositivos activos tal como accionadores piezoeléctricos en ciertas ubicaciones en la capa 3a de PDMS y accionarlos (por ejemplo, de forma eléctrica, u ópticamente) para generar un patrón de esfuerzo en la capa 3a de PDMS. De manera más general, los patrones de esfuerzo localmente definibles se pueden producir al embeber, en la capa 3a de PDMS, los patrones o modelos 6 de diferentes materiales que sufren diferentes cambios de volumen cuando se activan por un mecanismo químico o físico. Los mecanismos que pueden lograr este cambio de volumen incluyen, además del cambio de temperatura, un cambio en la humedad (por ejemplo, abultamiento, deshidratación), un cambio de la composición de solvente y/o concentración iónica (por ejemplo, accionadores de presión osmótica, geles de polielectrolitos, productos compuestos de polímero iónico-metal, polímeros conductores, accionadores de nanotubos de carbono), un cambio de pH, cambios de fase (por ejemplo, congelación de solvente embebido), reacciones químicas (por ejemplo, geles de polímero), activación eléctrica (por ejemplo, materiales piezoeléctricos o electrostrictivos, accionadores electrostáticos, polímeros electroactivos), activación magnética (por ejemplo, geles "magnéticos"), activación óptica (por ejemplo, elastómeros de cristal líquido, materiales fotorreactivos), etc., así como combinaciones de cualquiera o todos estos. También, en lugar de patrones localmente embebidos de diferentes materiales en la capa 3a de PDMS, es posible modificar localmente al PDMS mismo (de forma química) a fin de lograr el comportamiento deseado de cambio de volumen localmente diferentes, por ejemplo, al adicionar localmente diferentes cadenas laterales funcionales al polímero, o al cambiar localmente el grado de reticulación, por ejemplo, por irradiación UV.
- En una decimoquinta forma de realización, el inicio de la división en la etapa 4 se facilita y se mejora el control del proceso de división al proporcionar la oblea 2 con una o más zonas estructuralmente más débiles en ciertas ubicaciones específicas en la superficie de la oblea. Por ejemplo, se pueden crear una o más zonas pequeñas de defecto en el borde de la oblea 2. Estas zonas de defecto se pueden crear mecánicamente (por ejemplo, al golpear un cierto punto en el borde de la oblea con un martillo de punta filosa, destrozando localmente la estructura cristalina y creando una abolladura o muesca, o al cortar con sierra, rellenar, o moler, etc., a fin de crear una ranura o muesca), químicamente (por ejemplo, al grabar localmente una ranura), ópticamente (por ejemplo, al fundir localmente el material usando un láser, o al cortarlo para crear estructuras de ranura), o por otros mecanismos adecuados. La división entonces iniciará de manera preferente en aquellas zonas de defecto y se propagará sobre el resto del área de la oblea desde ahí. En particular, esto es ventajoso puesto que al variar la ubicación de estas zonas de defecto, es posible controlar mejor la profundidad inicial de la división, es decir, el espesor del disco delgado producido 5 en sus bordes, y en general mejorar la calidad de los bordes de los discos 5. Por ejemplo, una ranura en el borde (es decir, alrededor de la circunferencia) de la oblea 2 a la mitad entre las dos caras 1a y 1b puede facilitar la división en dos discos delgados 5 de igual espesor y con bordes de corte limpio. Las zonas más débiles de acuerdo a esta forma de realización se pueden crear antes de que se induzca el esfuerzo en la pieza de trabajo (por ejemplo, antes del enfriamiento), o se pueden crear en tanto que la oblea está ya bajo esfuerzo. El segundo procedimiento también permite controlar mejor el movimiento en tiempo cuando empieza la división: si el esfuerzo se acumula en la oblea hasta una magnitud justo ligeramente por encima del valor crítico donde empezará espontáneamente el proceso de división, entonces, tan pronto como se crea una debilidad, iniciará la división, preferentemente desde la ubicación de esa debilidad.
- En una decimosexta forma de realización, en lugar de dejar simplemente dividir espontáneamente la oblea, el inicio de la división en la etapa 4 se facilita al someter la oblea 2 a choque controlado, por ejemplo, una onda corta de choque. Por ejemplo, se puede inducir una onda corta en la oblea por uno o más soplos controlados con un dispositivo mecánico tal como un martillo (martillado), al distribuir impulsos ultrasónicos, o por impulsos láser fuertes, etc. La distribución espacial, intensidad y características temporales de estas ondas de choque facilitan la modulación de, y el mejor control sobre, el proceso de división.

En una decimoséptima forma de realización, el presente procedimiento se usa en una oblea 2 que tiene ya estructuras de superficie existente en al menos una de sus caras 1a o 1b. Estas estructuras de superficie existentes (tal como zanjas, mesetas, membranas, ménsulas, pirámides, etc.), se pueden formar del material mismo de la oblea, o pueden comprender materiales adicionales (por ejemplo, contactos metálicos, capas antirreflexión, capas dieléctricas, capas epitaxiales, etc.), o cualquier combinación de estas. El PDMS entonces se aplica sobre estas estructuras existentes, cubriéndolas y circundándolas de forma conformacional, de modo que después de la curación del PDMS, estas estructuras existentes se lleguen a embeber parcialmente en las capas 3a y/o 3b de PDMS. Cuando la oblea 2 se divide en dos discos delgados 5, estas estructuras de superficie existentes se conservan en el lado de cada disco 5 que tiene aún la capa auxiliar 3a o 3b correspondiente de PDMS que se adhiere a éste, en tanto que el otro lado de cada disco 5 muestra una nueva estructura 7a o 7b de superficie creada por el presente procedimiento como una imagen del patrón 6. De esta manera, se pueden producir capas independientes, delgadas con estructuras de superficie complejas en un lado (posiblemente que comprendan también materiales adicionales, y proporcionar aún dispositivos funcionales completos tal como dispositivos electrónicos, ópticos, químicos, o micromecánicos) y otras estructuras de superficie en el otro lado, donde estas otras estructuras de superficie se forman del material de oblea y se determinan por el patrón 6 en la capa de PDMS. Se señala que las estructuras de superficie preexistentes en las caras 1a y/o 1b pueden tener algo de influencia en los patrones de esfuerzo y de esta manera las superficies 7a y 7b de superficie producidas, sin embargo, esta influencia frecuentemente es pequeña (puesto que el espesor de las estructuras de superficie preexistentes frecuentemente es mucho menor que el espesor de los discos) cualquiera también se puede compensar usando modelado apropiado de las capas 3a y/o 3b auxiliares.

En una decimoctava forma de realización, el presente procedimiento se usa en una oblea 2 que tiene ya estructuras internas (volumétricas) existentes, tal como por ejemplo, uno más gradientes de impurificador. Cuando la oblea 2 se divide en dos discos delgados 5, estas estructuras internas existentes se conservan en los correspondientes discos delgados 5. De esta manera, se pueden producir capas independientes, delgadas con superficies estructuradas que tienen estructuras internas (volumétricas) tal como gradientes de impurificador.

En una decimonovena forma de realización, combinando los aspectos de las dos formas de realización anteriores, el presente procedimiento se usa en una oblea 2 que tiene ya tanto las estructuras de superficie existentes como las estructuras internas (volumétricas) existentes. En particular, la oblea tiene dispositivos parcial o completamente funcionales (electrónicos, ópticos, micromecánicos, químicos, etc.), en una o ambas de sus caras 1a y/o 1b. Estos dispositivos pueden incluir LED, diodos láser, celdas solares, celdas solares en tándem, amplificadores de potencia, circuitos integrados en general, dispositivos microelectromecánicos tal como sensores o accionadores, etc. Entonces, el PDMS se aplica sobre estos dispositivos existentes en las caras de la oblea, cubriendo los dispositivos, y circundándolos de manera conformacional en el exterior, de modo que después de curar el PDMS, estos dispositivos existentes se lleguen a embeber parcialmente en las capas 3a y/o 3b de PDMS. Cuando la oblea 2 se divide en dos discos delgados 5, estos dispositivos existentes se conservan en el lado de cada disco 5 que tiene aún la correspondiente capa auxiliar 3a o 3b de PDMS, respectivamente, adhiriéndose, en tanto que el otro lado de cada disco 5 muestra una nueva estructura 7a o 7b de superficie creada como una imagen del patrón o modelo 6. De esta manera, se pueden producir capas independientes, delgadas de materiales en estado sólido que tienen dispositivos complejos, parcial o ya completamente funcionales en un lado, y otras estructuras de superficie en el otro lado, donde estas otras estructuras de superficie se forman del material de oblea y se determina por el patrón 6 en la capa de PDMS.

Como un ejemplo ilustrativo para una aplicación de la forma de realización anterior, las estructuras de superficie y las estructuras internas que constituyen la parte frontal (es decir, el lado que se ilumina durante la operación normal) de una celda solar de silicio, convencional (por ejemplo, la capa impurificada del lado frontal que incluye la unión pn, la rejilla de contacto metálico, frontal, el revestimiento antirreflexivo) se consideran y en lo siguiente se refieren como "estructuras de frente". En lugar de producir estas "estructuras de frente" sólo en un lado de una oblea como se hace convencionalmente, estas "estructuras de frente" se producen en ambos lados 1a y 1b de una oblea 2 gruesa de silicio monocristalino. Entonces, esta oblea 2 se divide en dos discos más delgados 5 como se describe anteriormente, por lo que se conservan las capas de dispositivo, tal que cada uno de estos dos discos 5 tiene ahora "estructuras de frente" pero sólo en un lado (es decir, el lado que tiene aún la correspondiente capa 3a o 3b de PDMS, adherida). En el otro lado de cada uno de los dos discos 5 está una superficie "fresca" que consiste en material de oblea a granel, con una estructura 7a o 7b de superficie determinada por un patrón 6 en el PDMS. Las superficies "frescas" de ambos discos se pueden procesar adicionalmente usando procedimientos convencionales para producir los lados posteriores de celdas solares de silicio (por ejemplo, impurificación de campo de superficie posterior, metalización por contacto de lado posterior, etc.), completando la fabricación de dos celdas solares de silicio. Este ejemplo muestra varias ventajas: La mayoría de las etapas de producción de celdas solares se pueden realizar en una oblea 2 relativamente gruesa (y por lo tanto menos frágil), que facilita el uso de procesos baratos tal como impresión por estarcido de los contactos, y simplifica en general el manejo de la oblea. También, se puede difundir el mismo impurificador (lado frontal) en la superficie completa de la oblea, es decir, en ambos de sus lados 1a y 1b, y no existe la necesidad, por ejemplo, de extraer de manera subsiguiente el impurificador de la parte posterior de la oblea (puesto que esto se logra automáticamente por el proceso de división). Lo mismo se mantiene para, por ejemplo, un revestimiento de antirreflexión, que también se puede producir en la oblea completa (por ejemplo, crecimiento oxidativo de SiO₂ y/o depósito de PECVD de nitruro Si₃N₄) y entonces automáticamente se

confina a un lado a través del proceso de división. De esta manera, se pueden eliminar o simplificar varios etapas de procesamiento para la producción de celdas solares por la aplicación del presente procedimiento. Estos beneficios se pronuncian de manera particular en otro ejemplo ilustrativo, donde, en lugar de celdas solares normales con contactos frontales y posteriores, se producen celdas solares de contacto posterior; entonces, casi todas las estructuras funcionales están en un lado de la celda (el lado posterior). Si se producen estas estructuras de lado posterior en ambas caras 1a y 1b de una oblea 2 gruesa de silicio monocristalino, entonces, después de la división usando el presente procedimiento, ambos de los discos delgados 5 producidos son celdas de contacto posterior, casi terminadas, ya (posiblemente que requieren sólo el depósito de un revestimiento de anti-reflexión en el otro lado). Por lo tanto, el presente procedimiento se puede aplicar para producir celdas solares, delgadas, de contacto posterior, de silicio monocristalino sin la necesidad de manejar estas obleas a través de la mayoría del proceso.

En otro aspecto, la invención se refiere a un dispositivo que comprende una plancha (bloque, lingote, disco, etc.), de un material en estado sólido dividida por una separación en dos piezas, una pieza que es el complemento geométrico de la otra pieza, de modo que al reducir la separación a cero, la forma, dimensiones y la masa de la plancha original se puede recuperar, sustancialmente sin pérdida de material (por ejemplo, sin huecos internos, etc.). Al menos una de estas dos piezas es una capa delgada, es decir, es una hoja sustancialmente plana o curvada que tiene un área de al menos 1 cm^2 , y a todo lo largo de esta área su espesor es más pequeño que 2 mm, de manera preferente más pequeño que 0,5 mm. Al menos una de las piezas de capa delgada, en sí misma, tiene una capa de al menos un material adicional de estado sólido (referido como capa auxiliar) adherido a esta en la cara opuesta a la separación. Para cada una de las dos piezas, aquellas superficies que dan hacia la separación no contienen materiales diferentes de los que se encuentran en el volumen de la plancha (excepto posiblemente por, por ejemplo, una capa de óxido, nativa, si las superficies son reactivas con y se exponen a aire).

En otra forma de realización, la invención se refiere a un dispositivo como se describe anteriormente pero donde, para cada una de las dos piezas, las superficies orientadas hacia la separación muestran una estructura de acuerdo a algún patrón, con las estructuras 7a de superficie en una pieza que son sustancialmente complementarias a las estructuras 7b de superficie en la otra pieza, y con el patrón que es sustancialmente una imagen de tamaño completo de un patrón correspondiente 6 en al menos una capa de al menos un material adicional de estado sólido (capa auxiliar) adherido a al menos una de las dos piezas. El patrón 6 en la capa auxiliar se realiza al tener partes de la capa auxiliar que exhiben propiedades de material local (tal como CTE localmente diferente o módulo elástico localmente diferente) diferente de aquellas de las áreas circundantes, que, por ejemplo, pueden incluir partes donde el material de la capa auxiliar se extraiga parcial o completamente (es decir, estructuras huecas). En otra forma de realización, el patrón 6 puede ser un patrón de esfuerzos que se induce temporalmente en la capa auxiliar al aplicar patrones de influencias físicas o químicas externas en la capa auxiliar, tal como patrones de luz, patrones de calor, patrones o modelos de fuerzas mecánicas externas que actúan en la capa auxiliar, etc.

El planteamiento de la presente invención también se puede usar para producir capas independientes, delgadas con superficies estructuradas de piezas de trabajo que consisten en materiales en estado sólido diferentes de silicio monocristalino (por ejemplo, silicio policristalino, zafiro, germanio, cuarzo, o materiales amorfos tal como vidrio). También, este planteamiento se puede usar con piezas de trabajo que están compuestas de varios materiales diferentes (materiales compuestos homogéneos o no homogéneos, etc.), o que tienen una estructura interna (productos laminados, etc.). Por ejemplo, el planteamiento se puede usar para piezas de trabajo que consisten en una oblea de silicio monocristalino con una capa de crecimiento epitaxial tal como nitruro de galio (GaN) en su superficie. Adicionalmente, para las capas auxiliares que se aplican sobre la pieza de trabajo, los materiales diferentes de PDMS, por ejemplo, otros polisiloxanos (que pueden incluir grupos organometálicos para, por ejemplo, actividad eléctrica) otros elastómeros, otros polímeros o plásticos en general, o metales tal como aluminio o plata, etc., se pueden usar. También es posible utilizar capas auxiliares que están compuestas de varios materiales diferentes (materiales compuestos homogéneos o no homogéneos, etc.), o que tienen una estructura interna (productos laminados, etc.). En general, la pieza de trabajo es un material en estado sólido, relativamente quebradizo. Se debe lograr una buena adhesión entre la pieza de trabajo y la capa auxiliar y se debe mantener a todo lo largo del proceso, y la capa auxiliar debe ser tratable con los procesos convenientes para imponer patrones de esfuerzo suficientemente fuertes sin romper la capa auxiliar misma.

También, el PDMS (u otro polímero) en la capa auxiliar se puede curar (es decir, sus cadenas poliméricas se reticular) por medios diferentes de calentar en una placa caliente. Por ejemplo, se puede calentar al soplar un gas caliente sobre este, o al irradiarlo, con, por ejemplo, luz infrarroja. De manera alternativa o adicionalmente, la curación se puede lograr usando aditivos químicos, radiación ultravioleta, o haz de electrones. El PDMS (u otro polímero, o en general cualquier material en la capa auxiliar) también se puede modificar químicamente para facilitar una forma particular de curación (o, en general, solidificación, generando posiblemente esfuerzo interno dentro de la capa durante la solidificación), por ejemplo, la curación de PDMS por irradiación con UV se puede facilitar, por ejemplo, al sumergir el PDMS en benzofenona (un fotosensibilizador que genera radicales bajo irradiación), o por ejemplo, al reemplazar los grupos metilo en el PDMS con sustituyentes fotorreactivos.

De manera similar, se pueden usar varios procedimientos alternativos para extraer la capa auxiliar de los discos 5 al final del proceso. En lugar de, o además de, el grabado químico de la capa auxiliar como se describe anteriormente, la capa también se puede extraer de manera mecánica por irradiación, haz de electrones y/o calor. Por ejemplo, se

puede desprender mecánicamente una capa auxiliar de PDMS de un disco delgado 5 de silicio monocristalino si la cara del disco opuesta a la capa de PDMS se fija de manera temporal (por ejemplo, se pega) a un soporte, y entonces, por ejemplo, iniciando desde una esquina, el PDMS se desprende lentamente y de forma cuidadosa al jalarlo en una dirección sustancialmente vertical a la superficie del disco, facilitado posiblemente al insertar una cuña o artículo similar entre la capa de PDMS y el disco 5. De manera alternativa, el PDMS (u otros polímeros) se pueden calentar simplemente, por ejemplo, con un láser o en un horno, por encima de su temperatura de descomposición (es decir, extracción por formación de cenizas). También se puede extraer por formación de cenizas en un plasma, por ejemplo, en un plasma de oxígeno. El PDMS también se puede modificar químicamente tal que se descompone más fácilmente, por ejemplo, bajo irradiación de UV. Finalmente, cualquiera o todos estos planteamientos se pueden combinar (y adaptar de forma directa si se usan materiales diferentes de PDMS para la capa auxiliar).

El presente planteamiento se puede aplicar a piezas de trabajo de casi cualquier forma arbitraria y no se limita a obleas planas. En particular, la presente invención se puede usar, por ejemplo, para desprender hojas delgadas con superficies estructuradas directamente de un lingote de silicio monocristalino que está aplanado en un lado. Para desprender una hoja plana es suficiente que la pieza de trabajo usada esté confinada por al menos una superficie plana. En esta superficie, la capa auxiliar entonces se aplica. Es posible desprender sólo una hoja, o se pueden desprender varias hojas de diferentes superficies de una pieza de trabajo al mismo tiempo. Finalmente, el presente planteamiento también se puede aplicar para producir cubiertas u hojas curvadas, independientes, delgadas con superficies estructuradas. Para este fin, la capa auxiliar se aplica sobre una superficie correspondientemente curvada de la pieza de trabajo. El cambio de temperatura (u otro proceso inductor de esfuerzo) entonces conduce a la división de una cubierta u hoja correspondientemente curvada, delgada del resto de la pieza de trabajo a lo largo de una zona de fractura modelada dentro de la pieza de trabajo. Esta zona de fractura modelada discurre en todas partes aproximadamente a la misma distancia a la interfaz entre la pieza de trabajo y la capa auxiliar, de modo que la hoja producida con los patrones de estructura de superficie tiene un espesor aproximadamente uniforme (excepto por los patrones 7a y 7b, donde se pueden producir deliberadamente variaciones de espesor).

Las propiedades de superficie de la superficie sobre la cual se aplica la capa auxiliar, no son críticas. La interfaz se puede pulir de forma lisa, o puede tener rugosidad significativa. Sólo es importante retener adhesión adecuada a la capa auxiliar. En particular, la superficie de fractura, que se forma en el resto de la pieza de trabajo cuando se desprende una hoja de la pieza de trabajo, se puede usar de manera subsiguiente como la superficie sobre la cual se aplica a la capa auxiliar. De esta manera, se puede volver a aplicar el presente planteamiento en el resto de la pieza de trabajo. De esta manera, se puede desprender sucesivamente la hoja después de otra hoja de una pieza de trabajo individual.

También, de una capa independiente, delgada, desprendida, con superficies estructuradas, se pueden desprender capas adicionales (más delgadas) al repetir las mismas etapas. Por ejemplo, usando el presente procedimiento, se puede dividir una oblea de silicio monocristalino en dos discos con superficies estructuras al aplicar capas auxiliares de PDMS en ambos lados; ninguna, una o ambas de estas capas auxiliares puede tener un patrón 6, y si ambas tienen patrones, estos patrones pueden ser los mismos o diferentes uno del otro. Cada uno de estos dos discos más delgados, producidos entonces se puede proporcionar nuevamente en ambos lados con una capa auxiliar de PDMS, nuevamente con ninguna, una o ambas de estas que tienen patrones (6) que pueden ser los mismos o diferentes, y repitiendo las etapas del procedimiento, de esta manera se puede dividir adicionalmente en dos discos aún más delgados con superficies estructuradas (que tienen diferentes patrones de estructura de superficie, si se desea) y así sucesivamente. De esta manera, se puede obtener un gran número de discos monocristalinos delgados con superficies estructuradas a partir de una oblea individual de silicio monocristalino. Por ejemplo, en tres etapas, se pueden obtener ocho discos de aproximadamente 50 μm de grueso con superficies estructuradas a la medida de una oblea habitual de 0,4 mm de grueso.

En general, las dimensiones de las capas independientes, delgadas, producidas de esta manera, en particular sus espesores, se pueden ajustar a través de la elección apropiada del mecanismo inductor de esfuerzo (por ejemplo, el cambio de temperatura), y/o las propiedades de la capa auxiliar. Esto se logra en particular a través de la elección apropiada del flujo de tiempo de la inducción de esfuerzo, la magnitud del esfuerzo inducido, las dimensiones de la capa auxiliar, la forma geométrica de la capa auxiliar, y/o las propiedades mecánicas y/o térmicas/ópticas/químicas/hidrostáticas/piezoeléctricas/etc. de la capa auxiliar.

La capa auxiliar se puede aplicar, por ejemplo, en estado líquido o gaseoso sobre la superficie correspondiente de la pieza de trabajo, y entonces se solidifica. De manera alternativa, la capa auxiliar también se puede adherir directamente en el estado sólido sobre la superficie. La adhesión entre la capa auxiliar y la superficie de la pieza de trabajo se puede lograr a través de unión química, a través de fuerzas de van der Waals, u otras fuerzas adhesivas fuertes. También, una adhesión a través de formar aleación entre el material de la capa auxiliar y la pieza de trabajo en la interfaz, o al adherir la capa auxiliar por medio de un tercer material (por ejemplo, un adhesivo) sobre la superficie de la pieza de trabajo, son posibles para la implementación del presente procedimiento.

Finalmente, en lugar de nitrógeno líquido, se pueden usar otros refrigerantes (por ejemplo, helio líquido, agua con hielo, o sólidos de enfriamiento o gases de enfriamiento, etc.), para acumular, por enfriamiento, los esfuerzos mecánicos necesarios dentro del producto compuesto de capa auxiliar-pieza de trabajo. En ciertos casos, es

suficiente simplemente enfriar el producto compuesto hasta temperatura ambiente, de modo que no se necesitará un refrigerante especial. Además, es posible en ciertos casos lograr los esfuerzos mecánicos necesarios dentro del producto compuesto al calentar en lugar de enfriar. Esencial para la acumulación de los esfuerzos mecánicos necesarios a una cierta temperatura T son una diferencia suficientemente grande en la expansión térmica entre la pieza de trabajo y al menos partes de la capa auxiliar, así como una diferencia suficientemente grande entre la temperatura T y la temperatura a la cual se adhirió la capa auxiliar sobre la pieza de trabajo.

Segunda forma de realización independiente (Figura 2)

De acuerdo a un aspecto diferente de la presente invención, se describe un procedimiento independiente para producir capas independientes, delgadas de materiales en estado sólido por división inducida por esfuerzo (fraccionamiento) de una pieza de trabajo, en particular un procedimiento que permite el uso de materiales baratos y poco contaminantes tal como polímeros en una capa auxiliar inductora de esfuerzo.

En una primera forma de realización, la pieza de trabajo, 2 es una oblea de silicio monocristalino comercialmente disponible. La figura 2 presenta esquemáticamente una secuencia representativa de proceso de acuerdo con la invención, en cuatro etapas (de la parte superior al fondo), en la vista en perspectiva. En adelante se hace referencia a la figura 2.

Etapa 1: La materia prima básica es una oblea 2 de silicio monocristalino, producida de acuerdo con el procedimiento de Czochralski como se usa, por ejemplo, en la industria de microelectrónicos o fotovoltaicos. La oblea 2 tiene un diámetro de aproximadamente 76 mm y un espesor de aproximadamente 0,4 mm. La oblea está ligeramente impurificada con n o p, tiene una resistividad eléctrica específica de aproximadamente 10 ohmios-cm, y sus dos caras 1a y 1b están orientadas paralelas a un plano de cristal <100>. Una o ambas caras 1a y/o 1b de la oblea se pueden pulir tipo espejo o simplemente grabar y plegar. La oblea 2 se puede usar directamente de la producción de la oblea, o se puede prelimpiar de manera general usando procedimientos convencionales (por ejemplo, con solventes orgánicos y agua, y por limpieza con oxidación de plasma).

Etapa 2: En cada cara 1a y 1b de la oblea 2, una capa delgada 3a y 3b de polidiorganosiloxano (por ejemplo, polidimetilsiloxano, o PDMS; los análisis siguientes se refieren a PDMS por conveniencia, pero se debe entender que se puede usar cualquier copolímero o polímero de silicón adecuado) se aplica y se cura (o se deja curar). Los espesores preferidos de estas capas auxiliares 3a y 3b están entre 0,01 mm y 10 mm, con un espesor de entre aproximadamente 0,1 mm y aproximadamente 1 mm que es el más preferido. Los espesores de las dos capas 3a, 3b son los mismos en esta forma de realización ilustrativa, pero en otras formas de realización, puede diferir los espesores de las dos capas. Para el PDMS, es posible usar, por ejemplo, SYLGARD 184 de Dow Corning, con una relación de mezclado de 1:10 entre el agente de curación, y el material base. La mezcla de PDMS líquido se desgasifica primero durante aproximadamente 1 hora en vacío, luego se aplica en cada cara 1a, 1b de la oblea 2 en el espesor deseado, y se cura en una placa caliente (por ejemplo, durante 30 minutos a 100°C). En esta forma de realización ilustrativa, las capas 3a, 3b de PDMS tienen espesores homogéneos sobre la mayoría del área de la oblea. Esto se puede lograr al poner la oblea en una superficie horizontal y al dejar que el PDMS alcance el equilibrio por gravedad antes de la curación. Después de que se cura el PDMS, el producto compuesto de tres capas (PDMS 3a – oblea 2 – PDMS 3b) se enfría hasta temperatura ambiente. Después de eso, cualquier PDMS que sobresalga a lo largo de la circunferencia de la oblea 2 se extrae mediante una cuchilla filosa, tal que el borde de la oblea 2 está esencialmente libre de PDMS, y el PDMS cubre sólo las dos caras 1a y 1b de la oblea 2. Es posible evitar que cualquier PDMS sobresalga sobre la circunferencia de la oblea (y de esta manera toque el borde de la oblea) al aplicar el PDMS a la cara de la oblea cuidadosamente y al dejarlo llegar al equilibrio en una superficie horizontal; de esta manera, la tensión superficial del PDMS se le impedirá que se desparrame sobre los bordes de la oblea.

Etapa 3: El producto compuesto (PDMS 3a – oblea 2 – PDMS 3b) se sumerge completamente en un baño de nitrógeno líquido (temperatura de aproximadamente -200°C). Debido a los coeficientes de expansión térmica fuertemente diferentes del silicio (aproximadamente $3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) y del PDMS (aproximadamente $300 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), se inducen grandes esfuerzos mecánicos en el producto compuesto por este enfriamiento. Después de que las capas 3a, 3b de PDMS han alcanzado sustancialmente el equilibrio térmico con el baño circundante de nitrógeno líquido (por ejemplo, cuando el “burbujeo” intenso en el nitrógeno líquido alrededor de las capas 3a, 3b de PDMS cesa), el producto compuesto se extrae del baño nuevamente, se expone a temperatura ambiente, y se deja calentar durante un periodo muy corto. Este tiempo de calentamiento se elige preferentemente corto de forma suficiente tal que al menos alguna parte de las capas 3a y 3b de PDMS aún estén a temperaturas por debajo de la temperatura de transición vítrea del PDMS (-125°C), y suficientemente largo de modo que al menos algunas partes de las capas 3a, 3b de PDMS logren temperaturas por encima de la temperatura de transición vítrea del PDMS. Por ejemplo, un tiempo preferido de calentamiento está entre 1 y 5 segundos para capas de 0,4 mm de grueso de PDMS. Esto conduce a condiciones físicas no homogéneas dentro de la capa auxiliar, es decir, la distribución de temperatura dentro de las capas 3a y 3b de PDMS no es homogénea, con temperaturas que varían desde aproximadamente temperatura ambiente hasta por debajo de aproximadamente -200°C. Puesto que la temperatura de transición vítrea del PDMS es aproximadamente -125°C, y puesto que el PDMS llega a ser relativamente más rígido (es decir, módulo elástico más grande) a temperaturas por debajo de la temperatura de transición vítrea, esto da por resultado

que las capas 3a y 3b de PDMS sean más rígidas (es decir, módulo elástico más grande) hacia sus entrecaras entre la oblea 2 y más blandas (módulo elástico más pequeño) en sus exteriores.

5 Etapa 4: Después del tiempo corto de calentamiento, la oblea 2 se golpea, por ejemplo, con un martillo de punta afilada (martillado) en una ubicación específica en el lado de la oblea 2, es decir, en un punto a lo largo de su borde, que no está cubierto por las capas 3a y 3b de PDMS. Esto conduce a una zona o defecto localmente débil en la oblea 2, que a su vez activa un proceso de fractura: La oblea 2 se divide espontáneamente, en un movimiento de propagación de fractura, sustancialmente individual e ininterrumpido, paralelo a su superficie 1a, en dos discos 5 de silicio monocristalino, delgados, con un lado de cada disco 5 que tiene aún la capa 3a o 3b auxiliar correspondiente de PDMS que se adhiere.

10 Con el cuidado adecuado, cada uno de los dos discos 5 de silicio consiste esencialmente en una pieza individual. A fin de evitar ruptura adicional perpendicular a la superficie 4, los discos 5 se pueden transferir, directamente después de la división, sobre una placa caliente a 100°C (con el lado que tiene la capa auxiliar 3a o 3b de PDMS adherida orientado hacia abajo), hasta que la capa auxiliar completa de PDMS se ha calentado nuevamente al menos a temperatura ambiente. No importa qué procedimiento de calentamiento se emplee, se prefiere que los discos 5 se presionen cuidadosamente contra un soporte plano conforme se calientan de modo que se invierta cualquier ondulación de las capas, para aplanar las capas conforme prosigue el calentamiento.

15 Los discos 5 delgados de silicio producidos de acuerdo a este procedimiento consisten sustancialmente de silicio monocristalino con las mismas propiedades como la oblea 2 original y se pueden usar directamente. De manera alternativa, las capas auxiliares 3a o 3b de PDMS también se puede extraer de los discos 5 de silicio, por ejemplo por inmersión de un grabador líquido apropiado (por ejemplo, una mezcla 3:1 en volumen de NMP (N-metilpirrolidona) y TBAF/THF (fluoruro de tetrabutilamonio, solución 1,0M en tetrahidrofurano), o también por inmersión en ácido hidrofúrico). Una manera preferida para extraer las capas auxiliares 3a o 3b de PDMS es al enjuagar con, o por inmersión en un baño de, grabador de ácido sulfúrico caliente (H₂SO₄), de manera preferente a una temperatura por encima de 150°C (y de manera más preferente por encima de 200°C), luego extraer mecánicamente la espuma blanca de sílice (por ejemplo, usando un cepillo, y posiblemente varios ciclos de cepillado-grabado), y finalmente limpiar el disco 5 de silicio por inmersión en ácido hidrofúrico.

20 En una segunda forma de realización ilustrativa, la etapa de inicio de fractura (etapa 4) se realiza hasta que el producto compuesto (PDMS 3a - oblea 2 - PDMS 3b) está aún sumergido en el baño de nitrógeno líquido, es decir, durante el enfriamiento después que ha alcanzado el equilibrio térmico con el baño circundante de nitrógeno líquido. En esta forma de realización, se omite el tiempo corto de calentamiento intermedio.

25 En una tercera forma de realización ilustrativa, el tiempo de calentamiento de la etapa 3 se puede prolongar, tal que los esfuerzos térmicamente inducidos no sean por más tiempo suficientemente grandes para fracturar para iniciar cuando se golpea la oblea 2 con un martillo de punta filosa durante la etapa 4. En este caso, después de que se ha realizado la etapa 4 (sin que se presente la fractura), el producto compuesto (PDMS 3a - oblea 2 - PDMS 3b) se enfría nuevamente al sumergir en baño de nitrógeno líquido, que entonces conduce al inicio espontáneo del proceso de fractura .

30 En una cuarta forma de realización ilustrativa, además de o en lugar de crear un defecto o zona localmente débil en la oblea 2 durante la etapa 4, se aplica esfuerzo externo en ciertas ubicaciones en el exterior del producto compuesto (PDMS 3a - oblea 2 - PDMS 3b), que entonces activa el proceso de fractura (fraccionamiento) al incrementar localmente la intensidad del esfuerzo por encima del umbral de fuerza de fractura del material de oblea.

35 En una quinta forma de realización ilustrativa, se crea un defecto o zona localmente débil en la oblea 2 antes de la etapa de enfriamiento (etapa 3). En esta forma de realización, esta creación de una zona débil no activa el proceso de fractura, sino que permite definir una ubicación donde la fractura iniciará preferentemente una vez que se ha acumulado suficiente esfuerzo en la oblea 2 al enfriarla en la etapa 3 (la fractura entonces se iniciará espontáneamente en este caso, pero también se puede activar adicionalmente usando cualquiera de los procedimientos anteriores).

40 En una sexta forma de realización, en lugar de tener una capa 3a de PDMS con un CTE que es diferente sustancialmente del CTE de la oblea 2 y someter la estructura compuesta a un cambio de temperatura, también es posible emplear otros mecanismos para crear patrones predefinibles de esfuerzo en la capa 3a de PDMS que pueden inducir el patrón requerido de esfuerzo en la oblea 2. Un procedimiento alternativo es incluir accionadores piezoeléctricos en ciertas posiciones en la capa 3a de PDMS y activarlos eléctricamente para generar un patrón de esfuerzo en la capa 3a de PDMS. De manera más general, los patrones de esfuerzo localmente definibles se pueden producir al embeber, en la capa 3a de PDMS, patrones de diferente materiales que sufren diferentes cambios de volumen cuando se activan por un mecanismo químico o físico. Los mecanismo que pueden lograr este cambio de volumen incluyen, además del cambio de temperatura, un cambio en la humedad (por ejemplo, abultamiento, deshidratación), un cambio de composición de solvente y/o concentración iónica (por ejemplo, accionadores de presión osmótica, geles de polielectrolitos, productos compuestos de polímero iónico-metal, polímeros conductores, accionadores de nanotubos de carbono) un cambio de pH, cambios de fase (por ejemplo,

congelación del solvente embebido, cristalización, vaporización), reacciones químicas (por ejemplo, geles de polímero), activación eléctrica (por ejemplo, materiales piezoeléctricos o electrostrictivos, accionadores electrostáticos, polímeros electro-activos), activación magnética (por ejemplo, geles “magnéticos”), activación óptica (por ejemplo, elastómeros de cristal líquido, materiales fotorreactivos), etc., así como combinaciones de cualquiera de estos o todos estos. También, en lugar de embeber localmente diferentes materiales en la capa 3a de PDMS es posible modificar localmente al PDMS mismo (de manera química) a fin de lograr el comportamiento deseado de cambio de volumen localmente diferente, por ejemplo, al adicionar localmente diferentes cadenas laterales funcionales al polímero, o al cambiar localmente el grado de reticulación, por ejemplo, por irradiación UV.

En una séptima forma de realización, el presente procedimiento se usa en una oblea 2 que tienen las estructuras de superficie existente en al menos una de sus dos caras 1a o 1b. Estas estructuras de superficie existentes (tal como zanjas, mesetas, membranas, ménsulas, pirámides, etc.) se pueden formar del mismo material de oblea, o también pueden comprender materiales adicionales (por ejemplo, contactos metálicos, capas antirreflexión, capas dieléctricas, capas epitaxiales, etc., o cualquier combinación de estos. Entonces, el PDMS se aplica sobre estas estructuras existentes, cubriéndolas y circundándolas de manera conformacional, de modo que después de la curación del PDMS estas estructuras existentes se lleguen a embeber parcialmente en las capas 3a y/o 3b de PDMS. Cuando a oblea 2 se divide en dos discos delgados 5, estas estructuras de superficie existentes se conservan en el lado de cada disco 5 que tiene aún la correspondiente capa 3a o 3b auxiliar de PDMS que se adhiere al mismo. De esta manera, se pueden producir capas independientes, delgadas con estructuras de superficie, complejas en un lado (que comprende posiblemente materiales adicionales, y aún proporcionar dispositivos funcionales completos tal como dispositivos electrónicos, ópticos, químicos, o micromecánicos).

En una octava forma de realización, el presente procedimiento se usa en una oblea 2 que tiene estructuras internas (volumétricas) existentes, tal como por ejemplo, uno o más gradientes de impurificador. Cuando la oblea 2 se divide en dos discos delgados 5, estas estructuras internas existentes se conservan en los correspondientes discos delgados 5. De esta manera, se pueden producir capas independientes, delgadas que tienen estructuras internas (volumétricas) tal como gradientes de impurificador.

En una novena forma de realización, combinando los aspectos de las dos formas de realización anteriores, el presente procedimiento se usa en una oblea 2 que tiene tanto estructuras de superficie existentes como estructuras internas (volumétricas) existentes. En particular, la oblea tiene dispositivos parcial o completamente funcionales (electrónicos, ópticos, micromecánicos, químicos, etc.) en una o ambas de sus caras 1a y/o 1b. Estos dispositivos pueden incluir LED, diodos láser, celdas solares, celdas solares en tándem, amplificadores de potencia, circuitos integrados en general, dispositivos microelectromecánicos tal como sensores o accionadores, etc. El PDMS entonces se aplica sobre estos dispositivos existentes en las caras de la oblea, cubriendo los dispositivos, y circundándolos conformacionalmente en el exterior, de modo que después de la curación del PDMS, estos dispositivos existentes se llegan a embeber parcialmente en las capas 3a y/o 3b de PDMS. Cuando la oblea 2 se divide en dos discos delgados 5, estos dispositivos existentes se conservan en el lado de cada disco 5 que tiene aún la correspondiente capa auxiliar (3a o 3b, respectivamente) de PDMS que se adhiere. De esta manera, se pueden producir capas independientes, delgadas que tienen dispositivos complejos, parcial o ya sea completamente funcionales en un lado.

Como un ejemplo ilustrativo para una aplicación de la forma de realización anterior, las estructuras de superficie y las estructuras internas que constituyen la parte frontal de una celda solar, de silicio, convencional (por ejemplo, capa impurificada de lado posterior que incluye unión pn, rejilla de contacto de metal, frontal, revestimiento antirreflexivo, se consideran y en los siguientes se refieren como “estructuras frontales”. Entonces, en lugar de producir estas “estructuras frontales” sólo en un lado de una oblea como se hace convencionalmente, estas “estructuras frontales” se producen en ambos lados 1a y 1b de una oblea 2 gruesa de silicio monocristalino. Entonces esta oblea 2 se divide en dos discos más delgados 5 como se describe anteriormente, por lo que se conservan las capas de dispositivo, tal que cada uno de estos dos discos 5 presenta entonces “estructuras frontales” pero sólo en un lado (es decir, el lado que tiene aún adherida la capa 3a y 3b de PDMS correspondientes). En el otro lado de cada uno de los dos discos 5 está una superficie “fresca” que consiste en el material de oblea a granel. Las superficies “frescas” de ambos discos ahora se pueden procesar adicionalmente usando procedimientos convencionales para producir los lados posteriores de celdas solares de silicio (por ejemplo, impurificación de campo de superficie posterior, metalización por contacto del lado posterior, etc.), terminando la producción de dos celdas solares de silicio. Este ejemplo muestra varias ventajas: la mayoría de las etapas de producción de celdas solares se puede hacer en una oblea 2 relativamente gruesa (y por lo tanto menos frágil) que facilita el uso de procesos baratos tal como impresión en estarcido de los contactos, y simplifica en general el manejo de la oblea. También, se puede difundir el mismo impurificador (de lado frontal) en la superficie completa de la oblea, es decir, en ambos de sus lados 1a y 1b, y no resulta necesario, por ejemplo, de extraer subsiguientemente el impurificador de la parte posterior de la oblea (puesto que esto se logra automáticamente por el proceso de división). Lo mismo se mantiene, por ejemplo, para un revestimiento antirreflexión, que también se puede producir en la oblea completa (por ejemplo, crecimiento oxidante de depósito de SiO_2 y/o PECVD de nitruro de Si_3N_4) y entonces se confina automáticamente a un lado a través del proceso de división. De esta manera, se pueden eliminar o simplificar varias etapas de procesamiento para la producción de celdas solares por la aplicación del presente procedimiento. Estos beneficios se pronuncian particularmente en otro ejemplo ilustrativo, donde, en lugar de una celda solar normal con contactos

frontales y posteriores, se produce una celda solar de contacto posterior; casi todas las estructuras funcionales están en un lado de la celda (el lado posterior). Si esas estructuras de lado posterior se producen en ambas caras 1a y 1b de una oblea 2 gruesa de silicio monocristalino, entonces, después de la división usando el presente procedimiento, ambos de los discos delgados 5 producidos llegan a ser ya celdas de contacto posterior, casi terminadas (que requieren posiblemente sólo el depósito de un revestimiento anti-reflexión en el otro lado). Por lo tanto, el presente procedimiento se puede aplicar para producir celdas solares, de contacto posterior, delgadas, de silicio monocristalino sin la necesidad de manejar obleas delgadas a través de la mayoría del proceso.

En otro aspecto, la invención se refiere a un dispositivo que comprende una plancha (bloque, lingote, disco, etc.) de un material en estado sólido dividida por una separación en dos piezas, una pieza que es el complemento geométrico de la otra pieza, de modo que al reducir la separación a cero, se puede recuperar la forma, dimensiones y masa de la plancha original, sustancialmente sin ninguna ausencia de material (por ejemplo, huecos internos, etc.). Al menos una de estas dos piezas es una capa delgada, es decir, es una hoja sustancialmente plana o curva que tiene un área de al menos 1 cm^2 , y a todo lo largo de esta área su espesor es más pequeño que 2mm, de manera preferente más pequeño que 0,5 mm. Al menos una de las piezas de capa delgada, en sí misma, tiene una capa de al menos un material adicional de estado sólido (capa auxiliar) con propiedades del material localmente variables (por ejemplo, módulo elástico localmente variable) adherido a esta en la cara opuesta a la separación. Para cada una de las dos piezas, aquellas superficies orientadas hacia la separación no contienen materiales diferentes de los que se encuentran en el volumen de la plancha (excepto posiblemente por, por ejemplo, una capa de óxido nativo si las superficies son nativas con y se exponen a aire).

El planteamiento de la presente invención también se puede usar para producir capas independientes, delgadas de piezas de trabajo que consisten en materiales en estado sólido diferentes de silicio monocristalino (por ejemplo, silicio policristalino, zafiro, germanio, cuarzo, óxido de cinc, materiales amorfos tal vidrio). También, este planteamiento se puede usar con pieza de trabajo que se componen de varios materiales diferentes (materiales compuestos homogéneos o no homogéneos, etc.) o que tienen una estructura interna (productos laminados, etc.). Adicionalmente, para las capas auxiliares que se aplican sobre la pieza de trabajo, se pueden usar materiales diferentes de PDMS, por ejemplo, otros polisiloxanos (que pueden incluir grupos organometálicos por ejemplo para actividad eléctrica), otros elastómeros, otros polímeros o plásticos en general, o metales tales como aluminio o plata, etc. También es posible utilizar capas auxiliares que están compuestas de varios materiales diferentes (materiales compuestos homogéneos o no homogéneos, etc.) o que tienen una estructura interna (productos laminados, etc.). En general, la pieza de trabajo es un material en estado sólido, relativamente quebradizo. Se debe lograr una buena adhesión entre la pieza de trabajo y la capa auxiliar y se debe mantener a todo lo largo del proceso, y la capa auxiliar debe ser tratable con procesos convenientes para imponer patrones de esfuerzo suficientemente fuertes sin romper la capa auxiliar misma.

También, el PDMS (u otro polímero) en la capa auxiliar se puede curar (es decir, se reticulan sus cadenas poliméricas) por medios diferentes del calentamiento en una placa caliente. Por ejemplo, se puede calentar al soplar un gas caliente sobre ésta, o al irradiarla con, por ejemplo, luz infrarroja. De manera alternativa o adicionalmente, se puede lograr la curación usando aditivos químicos, radiación ultravioleta, o haz de electrones. El PDMS (u otro polímero, o en general cualquier material en la capa auxiliar) también se puede modificar químicamente para facilitar una forma particular de curación (o, en general, solidificación, posiblemente generando el esfuerzo interno dentro de la capa durante la solidificación), por ejemplo, la curación del PDMS por irradiación UV se puede facilitar, por ejemplo, al sumergir el PDMS en benzofenona (un fotosensibilizador que genera radicales bajo irradiación), o, por ejemplo al reemplazar los grupos metilo en el PDMS con sustituyentes fotoreactivos.

De manera similar, se pueden usar varios procedimientos alternativos para extraer la capa auxiliar de los discos 5 al final del proceso. En lugar de, además de grabar químicamente la capa auxiliar como se describe anteriormente, la capa también se puede extraer mecánicamente, por irradiación, haz de electrones, y/o calor. Por ejemplo, se puede dividir mecánicamente una capa auxiliar de PDMS de un disco delgado 5 si la cara de disco opuesta a la capa de PDMS se fija de manera temporal (por ejemplo, se pega) a un soporte, y entonces, por ejemplo, iniciando desde una esquina, el PDMS se divide lentamente y de forma cuidadosa al jalarlo en una dirección sustancialmente vertical a la superficie del disco. De manera alternativa, el PDMS (u otros polímeros) se pueden calentar simplemente, por ejemplo, con un láser o en un horno, por encima de su temperatura de descomposición (es decir, remoción por formación de ceniza). También se puede extraer por formación de ceniza en un plasma, por ejemplo, en un plasma de oxígeno. El PDMS también se puede modificar químicamente tal que se descompone más fácilmente, por ejemplo, bajo radiación UV o cuando se expone a calor. Finalmente, se pueden combinar cualesquiera o todos estos planteamientos (y adaptar directamente si se usan materiales diferentes de PDMS para la capa auxiliar).

El presente planteamiento se puede aplicar a la pieza de trabajo de cualquier forma arbitraria y no se limita a obleas planas. (En particular, la presente invención se puede usar, por ejemplo, para dividir hojas delgadas directamente y un lingote de silicio monocristalino que está aplanado en un lado). Para dividir una hoja plana es suficiente que la pieza de trabajo usada se confine por al menos una superficie plana. En esta interfaz, entonces se aplica una capa auxiliar. Es posible dividir sólo una hoja, o varias hojas se pueden dividir de diferentes entrecaras y una pieza de trabajo al mismo tiempo. Finalmente, el presente planteamiento también se puede aplicar para producir cubiertas u hojas curvadas, independientes, delgadas. Para este fin, la capa auxiliar se aplica sobre una superficie

correspondientemente curvada de la pieza de trabajo. El cambio de temperatura (u otro proceso inductor de esfuerzo) entonces se conduce a la división de una cubierta u hoja correspondientemente curvada, delgada, del resto de la pieza de trabajo a lo largo de una zona de fractura grabada con modelos o patrones dentro de la pieza de trabajo. Esta zona de fractura modelada discurre en todas partes aproximadamente a la misma distancia a la interfaz entre la pieza de trabajo y la capa auxiliar, de modo que la hoja producida con los patrones de estructura de superficie tiene un espesor aproximadamente uniforme.

No son críticas las propiedades de superficie de la interfaz sobre la cual se aplica la capa auxiliar. La interfaz se debe pulir lisamente, o también puede tener rugosidad significativa. Sólo es importante retener una adhesión adecuada a la capa auxiliar. En particular, la superficie de fractura, que se forma en el resto de la pieza de trabajo cuando se divide una hoja de la pieza de trabajo, se puede usar de manera subsiguiente como la interfaz sobre la cual se aplica la capa auxiliar. De esta manera, el presente planteamiento se puede volver a aplicar sobre el resto de la pieza de trabajo. De esta manera, se puede dividir sucesivamente hoja tras hoja de una pieza de trabajo individual.

También, de una capa independiente, delgada, dividida, se pueden dividir hojas adicionales (más delgadas) al repetir las mismas etapas. Por ejemplo, usando el presente procedimiento, se puede dividir una oblea de silicio monocristalino en dos discos al aplicar capas auxiliares de PDMS sobre ambos lados. Cada uno de estos dos discos más delgados entonces se puede proporcionar nuevamente en ambos lados con una capa auxiliar de PDMS, y, repitiendo las etapas del procedimiento, de esta manera se puede dividir adicionalmente en dos discos aún más delgados, y así sucesivamente. De esta manera, se puede obtener un gran número de discos monocristalinos delgados de una oblea individual de silicio monocristalino. Por ejemplo, en tres etapas, se pueden obtener ocho discos de aproximadamente 50 micrómetros de grueso de una oblea común de 0,4 mm de grueso.

En general, las dimensiones de las capas independientes, delgadas, producidas de esta manera, en particular sus espesores se pueden ajustar a través de la elección apropiada del mecanismo inductor de esfuerzo (por ejemplo, el cambio de temperatura), y/o las propiedades de la capa auxiliar. Esto se logra en particular a través de la elección apropiada del flujo del tiempo de la inducción de esfuerzo, la magnitud del esfuerzo inducido, las dimensiones de la capa auxiliar, la forma geométrica de la capa auxiliar y/o las propiedades mecánicas locales y/o térmicas/químicas/hidroestáticas/piezoeléctricas/etcétera locales de la capa auxiliar.

La capa auxiliar se puede aplicar, por ejemplo, en un estado líquido o gaseoso sobre la interfaz correspondiente de la pieza de trabajo, y entonces se puede solidificar. De manera alternativa, la capa auxiliar también se puede adherir directamente en el estado sólido sobre la interfaz. La adhesión entre la capa auxiliar y la interfaz se puede lograr a través de la unión química, fuerzas de van-der-Waals, u otras fuerzas adhesivas fuertes. También, una adhesión a través de la formación de aleación de la capa auxiliar y el material de la pieza de trabajo en la interfaz, o adhiriendo la capa auxiliar por medio de un tercer material (por ejemplo, a un adhesivo) sobre la interfaz de la pieza de trabajo, son posibles para la implementación del presente procedimiento.

Finalmente, en lugar de nitrógeno líquido, se pueden usar otros refrigerantes (por ejemplo, helio líquido, agua con hielo, o sólidos de enfriamiento o gases de enfriamiento, etc.) para acumular, por enfriamiento, los esfuerzos mecánicos necesarios dentro del producto compuesto de capa auxiliar-pieza de trabajo. En ciertos casos, es suficiente enfriar simplemente el producto compuesto desde una mayor temperatura a temperatura ambiente, de modo que no se necesitará un refrigerante especial. Adicionalmente, es posible en ciertos casos lograr los esfuerzos mecánicos necesarios dentro del producto compuesto por calentamiento en lugar de enfriamiento. Esenciales para la acumulación de los esfuerzos mecánicos necesarios a una cierta temperatura T son una diferencia suficientemente grande en la expansión térmica entre la pieza de trabajo y al menos partes de la capa auxiliar, así como una diferencia suficientemente grande entre la temperatura T y la temperatura a la cual se adhirió la capa auxiliar sobre la pieza de trabajo.

De acuerdo con esta forma de realización independiente de la presente invención, la producción de capas independientes, delgadas de materiales en estado sólido por división inducida por esfuerzo (fraccionamiento) de una pieza de trabajo se mejora al proporcionar un procedimiento que permite el uso de una capa auxiliar inductora de esfuerzo que comprende materiales baratos y pocos contaminantes tal como polímeros. Las formas de realización de la invención proporcionan un proceso simple y barato que reduce las dificultades identificadas anteriormente para usar estos materiales.

En varias formas de realización, se producen capas independientes, delgadas de materiales en estado sólido al usar esfuerzos mecánicos que se inducen por cambios físicos químicos (por ejemplo, cambios de temperatura) en cuerpos sólidos mutuamente adherentes que tienen diferentes propiedades de material, por ejemplo, diferente coeficiente de expansión térmica (CTE). Para este fin, además de una pieza de trabajo que consiste en un material en estado sólido (que presenta de manera preferente un módulo elástico mayor de 100 MPa, de manera más preferente mayor de 1 GPa), se usa otro material sólido, cuyas dimensiones físicas (por ejemplo su volumen) cambian, cuando se somete a una cierta secuencia de cambios físicos tal como cambios de temperatura y/o cambios de presión externa, de esa manera que es sustancialmente diferente de los cambios correspondientes en la pieza de trabajo cuando la pieza de trabajo se somete a la misma secuencia de cambios físicos (por ejemplo, un

material sólido cuya expansión térmica difiere sustancialmente de la expansión térmica de la pieza de trabajo), y que se pueden unir a la pieza de trabajo a través de adhesión fuerte. Una capa de este material adicional (a la que se hace referencia en adelante como "capa auxiliar") se adhiere sobre la superficie de una pieza de trabajo. La estructura compuesta que consiste en la pieza de trabajo y la capa auxiliar entonces se somete a una secuencia de cambios físicos tal como cambios de temperatura y/o cambios de presión externa. Bajo condiciones apropiadas, los esfuerzos mecánicos que se inducen de esta manera en la estructura compuesta conducen a la división ("fraccionamiento") de una capa delgada de la pieza de trabajo, sustancialmente en paralelo a la interfaz entre la pieza de trabajo y la capa auxiliar. El área de la capa delgada dividida de material en estado sólido corresponde aproximadamente al área de la capa auxiliar. Cada una de las dos superficies formadas cuando la capa delgada se divide de la pieza de trabajo se puede usar nuevamente, es decir, se puede aplicar otra capa auxiliar a la cara recién expuesta de la pieza de trabajo o a la cara recién expuesta de la capa dividida. De esta manera, las formas de realización de la presente invención facilitan operaciones repetidas de división, tanto del resto de la pieza de trabajo como de una capa dividida, creando capas adicionales (y más delgadas). También, para algunos ejemplos de piezas de trabajo (por ejemplo, piezas de trabajo que consisten sustancialmente en una hoja delgada, por ejemplo, una oblea), puede ser beneficioso formar capas auxiliares en dos o más caras (posiblemente opuestas) de la pieza de trabajo de material en estado sólido, por ejemplo, a fin de mejorar la estabilidad y evitar la destrucción del resto de la pieza de trabajo.

Por ejemplo, si se usan uno o más cambios de temperatura a fin de inducir los esfuerzos mecánicos requeridos entonces la diferencia absoluta en el CTE entre la pieza de trabajo y la capa auxiliar es mayor que $5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a temperatura ambiente, de manera preferente mayor que $50 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a temperatura ambiente, de manera más preferente mayor que $100 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a temperatura ambiente, y de manera más preferente mayor que $200 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a temperatura ambiente. Unas diferencias absolutas relativamente pequeñas en el CTE se pueden usar si tanto la pieza de trabajo como la capa auxiliar pueden sostener cambios absolutos grandes de temperatura (por ejemplo, aproximadamente 400°C o superior) sin fusión ni descomposición ni detener la adherencia entre sí, sin embargo, se prefieren diferencias absolutas más grandes en el CTE (por ejemplo, puesto que el uso de mayores temperaturas puede incrementar el riesgo de contaminación cruzada por difusión). Por ejemplo, la pieza de trabajo puede consistir en silicio con un CTE de aproximadamente $3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a temperatura ambiente, y la capa auxiliar puede comprender un polímero caracterizado por un CTE que es mayor que aproximadamente $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a temperatura ambiente. De manera preferente, el polímero se caracteriza por un CTE que es mayor que aproximadamente $50 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a temperatura ambiente, y de manera más preferente, el polímero se caracteriza por un CTE que es mayor que aproximadamente $200 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a temperatura ambiente. Por ejemplo, la capa auxiliar puede consistir de polidimetilsiloxano reticulado (PDMS), que tiene un CTE de aproximadamente $300 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a temperatura ambiente.

En varias formas de realización de la presente invención, se proporciona un procedimiento que permite el uso de una capa auxiliar inductora de esfuerzo que comprende materiales baratos y pocos contaminantes tal como polímeros, en particular el uso de materiales que, bajo condiciones normales, tienen un módulo elástico relativamente pequeño (por ejemplo, más pequeño que 100 MPa , posiblemente más pequeño que 10 MPa , o aún más pequeño que 1 MPa) y/o pequeña fuerza de fractura (por ejemplo, más pequeña que $5 \text{ MPa m}^{1/2}$, posiblemente más pequeña que $2 \text{ MPa m}^{1/2}$, o aún más pequeña que $1 \text{ MPa m}^{1/2}$).

En un ejemplo, se puede usar una capa auxiliar heterogénea que comprende diferentes materiales, donde un material tiene un módulo elástico relativamente grande pero no necesariamente una gran fuerza de fractura, y otro material tiene una fuerza de fractura relativamente grande pero no necesariamente un gran módulo elástico. De manera más precisa, la capa heterogénea comprende diferentes materiales, donde al menos un material tiene un módulo elástico relativamente grande, es decir un módulo elástico mayor de 10 MPa , de manera preferente mayor que 100 MPa , y de manera más preferente mayor que 1 GPa , y en donde al menos un material tiene una fuerza de fractura relativamente grande, es decir, una fuerza de fractura mayor de $1/10$ de la fuerza de fractura del material de la pieza de trabajo, y más preferente mayor que la fuerza de fractura del material de la pieza de trabajo, y más preferible mayor que 10 veces la fuerza de fractura del material de la pieza de trabajo, y donde al menos un material tiene la propiedad que, cuando se somete a una cierta secuencia de cambios físicos tal como cambios de temperatura y/o cambios de presión externa, sus dimensiones físicas (por ejemplo, su volumen) cambian de una manera sustancialmente diferente de los cambios correspondientes en el material de la pieza de trabajo cuando la pieza de trabajo se somete a la misma secuencia de cambios físicos (por ejemplo, un material cuyo CTE difiere del CTE de la pieza de trabajo por al menos $5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a temperatura ambiente, de manera preferente más de $50 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a temperatura ambiente, de manera más preferente más de $100 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a temperatura ambiente, y de manera más preferente más de $200 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a temperatura ambiente), y donde ningún material individual tiene todas las tres propiedades (es decir, gran módulo elástico, gran fuerza de fractura, y cambio de dimensión física sustancialmente diferente de la pieza de trabajo). Las concentraciones relativas de los diferentes materiales en la capa auxiliar heterogénea, por ejemplo también pueden depender de la posición dentro de la capa auxiliar, por ejemplo, más cerca a la interfaz con la pieza de trabajo del material en estado sólido, puede ser mayor la concentración del material que tiene mayor módulo elástico. Por ejemplo se puede crear una capa auxiliar heterogénea al mezclar pequeñas partículas de sílice (posiblemente nanoporosas) en el PDMS líquido, extendiendo esta mezcla sobre una superficie de la pieza de trabajo, y entonces curando (reticulando) la misma, por ejemplo por calor. En este ejemplo, a temperatura ambiente, el PDMS tiene un módulo de corte entre aproximadamente 100 kPa y 3 MPa y una fuerza de fractura entre $0,03$ y $4 \text{ MPa m}^{1/2}$. Las partículas de sílice tienen diámetros preferentemente entre $0,5$ y 10

micrómetros, módulo de corte de entre aproximadamente 20 y 40 GPa y una fuerza de fractura entre 0,1 y 1 MPa $m^{1/2}$, todo a temperatura ambiente. La concentración de las partículas de sílice en el PDMS está entre 1 % y 80 % en peso, de manera preferente entre 10 % y 30 % en peso. En otro ejemplo, se pueden localizar preferentemente las partículas de sílice más cerca a la interfaz entre la capa auxiliar y la pieza de trabajo es decir, su concentración en la matriz de PDMS es mayor cerca a la interfaz y menor (o cero) en otras partes de la capa auxiliar.

En otro ejemplo, se pueden usar diferentes formulaciones del mismo material en diferentes partes de la capa auxiliar, por ejemplo, se usan diferentes longitudes de cadena de polímero dependiendo de la posición dentro de la capa auxiliar. En aún otro ejemplo, se pueden usar diferentes grados de reticulación de cadenas poliméricas, dependiendo de la posición dentro de la capa auxiliar (un grado localmente mayor de reticulación se puede usar para incrementar localmente la temperatura de transición vítrea, es decir, para hacer el material más rígido en ubicaciones predefinibles dentro de la capa auxiliar). Los patrones predefinibles de áreas con un grado localmente diferente de reticulación se pueden crear, por ejemplo, a través de irradiación selectiva con una fuente de luz UV, por ejemplo, a través de una máscara o al dirigir una láser de UV sobre las áreas deseadas, en particular cuando se usan polímeros fotocurables.

En otro ejemplo, se puede convertir localmente un material en la capa auxiliar en otro material que tiene un diferente módulo elástico y/o fuerza de fractura, por ejemplo, por irradiación, calor, presión o reacción química. Por ejemplo, las partes o toda la superficie de una capa auxiliar que comprende sustancialmente PDMS se exponen a, por ejemplo, irradiación con UV, tratamiento con ozono, u oxidación con plasma. Bajo condiciones apropiadas, esto conduce, sustancialmente en aquellas ubicaciones que se expusieron, a la formación de una capa de superficie vidriosa en la capa auxiliar (por ejemplo, debido a la conversión de grupos $-CH_3$ a funcionalidades de grupos terminales $-OH$), y esta capa de superficie vidriosa localmente definida tiene propiedades más tipo vidrio, es decir, es más rígida (mayor módulo elástico) y que las otras partes de la capa auxiliar.

En otro ejemplo, se puede usar una capa auxiliar homogénea que comprende sustancialmente un material único. En este ejemplo, se proporcionan condiciones físicas tal que varíen las propiedades pertinentes de este material tal como fuerza de fractura y/o módulo elástico dependiendo de la posición dentro de la capa auxiliar. Por ejemplo, los polímeros frecuentemente son relativamente quebradizos (es decir, pequeña fuerza de fractura, por ejemplo, más pequeña que 1 MPa $m^{1/2}$) con un módulo elástico comparativamente grande (es decir, "más rígido", que tiene por ejemplo un módulo de corte mayor de 100 MPa, o aún mayor que 1 GPa) a temperaturas por debajo de su temperatura de transición vítrea, y son más dúctiles (es decir, con mayor fuerza de fractura, por ejemplo mayor que 1 MPa $m^{1/2}$) pero con un módulo elástico comparativamente pequeño (es decir, "más blando", por ejemplo que tiene un módulo de corte más pequeño que 100 MPa, o aún más pequeño que 10 MPa) a temperatura por encima de su temperatura de transición vítrea. Al ajustar un perfil de distribución pre-definida de temperatura (por ejemplo un gradiente de temperatura) dentro de una capa auxiliar que comprende este polímero, con la temperatura de transición vítrea del polímero que está entre la temperatura mínima y la temperatura máxima en esta distribución de temperatura, entonces en ciertas ubicaciones predefinibles dentro de la capa auxiliar, el material de la capa auxiliar llega a ser más dúctil y/o "más blando", en tanto que en otras ubicaciones predefinibles, resulta relativamente más quebradizo y/o "más rígido". Por ejemplo, manteniendo la interfaz entre la pieza de trabajo y la capa auxiliar de adhesión a una temperatura por debajo de la temperatura de transición vítrea y el polímero que comprende la capa auxiliar en tanto que mantiene la cara opuesta ("libre") de la capa auxiliar a una temperatura por encima de la temperatura de transición vítrea, da por resultado un gradiente de temperatura a través de la capa auxiliar. En este ejemplo, esto conduce a partes de la capa auxiliar más cerca a la interfaz que son más quebradizas y/o "más rígidas", y a partes de la capa auxiliar más próximas a su cara "libre" que son más dúctiles y/o "más blandas".

En un ejemplo similar, las condiciones físicas no homogéneas dentro de la capa auxiliar se pueden usar para inducir propiedades de material localmente variables para el material de capa auxiliar, por ejemplo, al crear un patrón predefinido de distribuciones de temperatura dentro de la capa auxiliar. En este ejemplo, se usan distribuciones más complejas de temperatura que los gradientes simples de temperatura, que se pueden crear, por ejemplo, al usar un material de capa auxiliar con una conductividad térmica relativamente baja y al someterlo a un patrón temporal de cambios de temperatura. Por ejemplo, al mantener un lado de la capa auxiliar a una temperatura por debajo de la temperatura de transición vítrea (T_g) del material de la capa auxiliar, y al cambiar la temperatura aplicada en el lado opuesto de la capa auxiliar de una temperatura por debajo de T_g a una temperatura por encima de T_g y nuevamente de regreso a la temperatura por debajo de T_g (usando una velocidad apropiada de cambio de temperatura que depende, por ejemplo, de la conductividad térmica y de la capacidad térmica del material) es posible lograr una distribución de temperatura con un máximo por encima de T_g dentro de la capa auxiliar y a temperaturas por debajo de T_g en el exterior. De esta manera, es posible, por ejemplo, crear una capa auxiliar que sea relativamente dúctil "blanda" dentro y "más rígida" (y posiblemente más quebradiza) en sus partes exteriores. En este ejemplo, la distribución de temperatura dentro de la capa auxiliar no es estable con el paso del tiempo, y de esta manera puede ser preferible iniciar la división de la capa delgada exactamente en un cierto momento predefinido en el tiempo, por ejemplo, usando el inicio de división dinámica descrito a continuación adicionalmente.

Por ejemplo, en una capa auxiliar que comprende sustancialmente PDMS (con una conductividad térmica de aproximadamente $0,15 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ y una temperatura T_g de transición vítrea de aproximadamente -125°C), se puede lograr una distribución de temperatura que tiene un máximo por encima de T_g dentro de la capa auxiliar y

temperaturas por debajo de T_g en el exterior, por ejemplo, al dejar que la capa auxiliar alcance el equilibrio térmico (por ejemplo a temperatura ambiente), y luego el enfriar el exterior de la capa auxiliar a una temperatura de aproximadamente -200°C (por ejemplo, al colocar las superficies exteriores de la capa auxiliar en contacto térmico con un baño de nitrógeno líquido) durante unos pocos segundos (por ejemplo, 2 segundos para una capa de aproximadamente 0,5 mm de grueso). Debido a la conductividad térmica relativamente baja del PDMS, de esta manera, se logra una distribución de temperatura con un máximo por encima de T_g dentro de la capa auxiliar y temperaturas por debajo de T_g en el exterior, dando por resultado una capa auxiliar que es relativamente dúctil y "blanda" dentro y "más rígida" en sus partes exteriores. En algunos ejemplos, se puede mejorar el contacto térmico entre la superficie de capa auxiliar y el nitrógeno líquido (o cualquier otro depósito frío), por ejemplo, al sumergir la capa auxiliar en un baño enfriado de isopentano (para temperaturas entre aproximadamente -160°C y 0°C) en lugar de colocarlo en contacto térmico directo con nitrógeno líquido.

En otro ejemplo, se pueden aplicar diferentes temperaturas (posiblemente también cambiando con el paso del tiempo) en diferentes ubicaciones en la capa auxiliar.

En otro ejemplo, los parámetros físicos diferentes de la temperatura se pueden usar para crear y controlar condiciones físicas no homogéneas dentro de la capa auxiliar que inducen propiedades de material localmente variables para el material de capa auxiliar. Por ejemplo, la presión mecánica localmente aplicada incrementa localmente la temperatura T_g de transición vítrea de ciertos materiales (y, para algunos materiales, incrementa localmente el módulo de corte y/o disminuye la fuerza de fractura). O, en otro ejemplo, sometiendo un cierto material de capa auxiliar tal como por ejemplo, PDMS, a patrones espacial y/o temporalmente variables de vibraciones mecánicas de alta frecuencia (por ejemplo 100 MHz) (es decir, ondas acústicas) se induce localmente las transiciones de consistencia tipo caucho a vítreas, es decir, incrementa localmente tanto la temperatura de transición vítrea como el módulo de corte del material de la capa auxiliar. También, al aplicar golpes agudos localizados al material de la capa auxiliar se logra un efecto similar para ciertos materiales (por ejemplo, comparar el ejemplo bien conocido de "plastilina" que se destruyen en el impacto cuando se golpea agudamente con un martillo pero se forma si se aplica lentamente la misma presión, es decir, bajo un golpe agudo se comporta como si su T_g se ha aumentado). De manera más general, el hecho bien conocido se puede usar que frecuentemente las propiedades viscoelásticas de los polímeros (incluyendo la temperatura de transición vítrea) tiene dependencia de la velocidad, y de esta manera puede ser posible inducir patrones espaciales y/o temporales predefinibles de diferentes propiedades viscoelásticas en el material de la capa auxiliar al someter el material a patrones espaciales y/o temporales predefinidos de cambios de parámetros físicos, tal como patrones de ondas acústica, patrones de cambios de campo eléctrico o magnético, patrones de cambios de temperatura, etc. También, en algunos de estos ejemplos, los patrones inducidos de propiedades de material localmente diferentes dentro de la capa auxiliar no pueden ser estables con el paso del tiempo, y de esta manera puede ser preferible iniciar la división de la capa delgadas exactamente en un cierto momento predefinido de tiempo, por ejemplo, usando el inicio de división dinámica descrito adicionalmente a continuación.

En otro ejemplo, las condiciones físicas no homogéneas dentro de la capa auxiliar que se crean usando cualquiera de los procedimientos anteriores pueden incluir crear propiedades anisotrópicas del material en partes predefinidas de la capa auxiliar. Por ejemplo, alineando y/o orientando de manera preferencial las cadenas de polímero en ciertas partes predefinidas de una capa auxiliar que comprende sustancialmente un polímero da por resultado partes predefinibles de capa auxiliar que tienen un módulo elástico sustancialmente anisotrópico. Por ejemplo, esto facilita que la fractura (fraccionamiento) inicie y/o progrese más preferencialmente a lo largo de ciertas direcciones en la pieza de trabajo en lugar que a lo largo de otras direcciones. En otro ejemplo, se usa una capa auxiliar que comprende uno o más materiales con propiedades anisotrópicas del material para producir capas delgadas de una pieza de trabajo que también tiene propiedades anisotrópicas del material. Por ejemplo, una pieza de trabajo cristalina puede ser más frágil en ciertas orientaciones cristalinas que a lo largo de otras, que conduce a grietas verticales indeseadas en la capa delgada producida y posiblemente aún a la ruptura (de extrusión). Al elegir una capa auxiliar con propiedades anisotrópicas del material (por ejemplo, módulo elástico anisotrópico, o CTE anisotrópico) y al orientar apropiadamente esta capa auxiliar (con respecto a la pieza de trabajo) se reduce en este ejemplo el riesgo de destrucción indeseada de la pieza de trabajo o la capa delgadas producida. Por ejemplo, si la fractura se presenta más fácilmente (es decir, es más pequeña a la fuerza de fractura) a lo largo de planos que están orientados en una dirección específica (por ejemplo, el plano monocristalino <111> en el silicio monocristalino), entonces se reduce el riesgo de estas fracturas que se presentan durante la producción de la capa delgada al usar una capa auxiliar cuyo CTE es anisotrópico, y al orientar la dirección en la cual la diferencia absoluta entre el CTE de la capa auxiliar y el CTE de la pieza de trabajo es más grande en una dirección que está sustancialmente no perpendicular a estos planos de fácil fractura.

En otro ejemplo, si el CTE del material de la capa auxiliar depende sustancialmente de ciertas condiciones físicas tal como la temperatura o presión mecánica aplicada, etc., entonces el CTE también se puede controlar localmente al ajustar las condiciones físicas no homogéneas en la capa auxiliar.

En otro ejemplo, se pueden combinar la etapa de inducir patrones o modelos predefinidos de propiedades de material localmente diferentes (tal como propiedades viscoelásticas dependientes de la posición) en el material de la capa auxiliar, y la etapa de establecer una distribución deseada de esfuerzo en la capa auxiliar para la división de la

capa delgada de la pieza de trabajo. Por ejemplo, para un material de capa auxiliar que tiene un CTE sustancialmente diferente del CTE de la pieza de trabajo, se usa el establecimiento de una distribución no homogénea de temperatura dentro de la capa auxiliar para ciertos materiales de la capa auxiliar tal como PDMS para crear tanto la distribución no homogénea deseada de las propiedades del material (tal como distribución no homogénea del módulo de corte) y al mismo tiempo se usa para inducir la distribución deseada de esfuerzo en la capa auxiliar y la capa de trabajo de adhesión. También, si el esfuerzo se induce a través de un cambio de temperatura se prefiere si la temperatura máxima usada durante el proceso completo es tan baja como sea posible, de manera preferente no mayor que 100°C, de manera más preferente no mayor que la temperatura ambiente, a fin de reducir el riesgo de difusión de contaminantes en la capa delgada. Por lo tanto, la temperatura mínima lograda durante el cambio de temperatura, inductor de esfuerzo, está preferentemente significativamente por debajo de 0°C, de manera más preferente por debajo de 80°C, y de manera más preferente por debajo de 150°C, puesto que un cambio relativamente más grande de temperatura permite inducir mayor esfuerzo. Por lo tanto, puesto que en este ejemplo, se usa el cambio de temperatura para inducir esfuerzo y al mismo tiempo para crear la distribución no homogénea, deseada de las propiedades del material en la capa auxiliar, se prefiere usar una capa auxiliar cuyas propiedades de material (tal como módulo de corte) cambian sustancialmente durante el cambio correspondiente de temperatura, que comprende de manera preferente temperaturas por debajo de temperatura ambiente. Por ejemplo, para una capa auxiliar que comprende sustancialmente un polímero, la temperatura de transición vítrea del polímero está preferentemente por debajo de temperatura ambiente, de manera más preferente por debajo de 0°C, y de manera más preferente por debajo de 100°C. Por ejemplo, se prefiere PDMS como el material de la capa auxiliar en este ejemplo puesto que tiene una temperatura de transición vítrea de aproximadamente -125°C y su módulo de corte cambia sustancialmente para temperaturas por arriba y por debajo de su temperatura de transición vítrea.

En otro ejemplo, puede ser deseable (por ejemplo, debido a las propiedades temporalmente variables del material en la capa auxiliar, ver anteriormente) activar activamente la división de la capa delgada en un punto específico de tiempo, es decir, una clase de "inicio dinámico de división". Puesto que la fractura de la pieza de trabajo del material en estado sólido que está por debajo de un cierto esfuerzo inicia usualmente de manera preferencial en zonas o defectos estructuralmente más débiles en el material, y puesto que una vez que se forma una fractura se requiere menos esfuerzo para extender adicionalmente la fractura o grieta, es posible establecer primero una cantidad relativamente grande de esfuerzo en una pieza de trabajo sustancialmente libre de defecto sin que se presente ninguna fractura, y entonces en un punto deseado de tiempo crean artificialmente un defecto o zona débil en la pieza de trabajo que entonces conduzca al inicio inmediato del proceso de fractura (es decir, active la división de la capa delgada), sin requerir incrementar adicionalmente el esfuerzo en la capa de trabajo. Estos defectos o zonas débiles se pueden crear mecánicamente al administrar un choque controlado a la pieza de trabajo (por ejemplo, al golpear un cierto punto en la pieza de trabajo con un martillo de punta filosa (martillado), destruyendo de este modo localmente la estructura cristalina y creando una abolladura o muesca, o al administrar impulsos ultrasónicos, o por impulsos láser fuertes, o por corte con sierra, relleno, o molienda, etc.), de manera química (por ejemplo, al grabar localmente una ranura), de forma óptica (por ejemplo, al fundir localmente el material usando un láser, o al someterlo a ablación para crear estructuras de ranura), o por otros mecanismos adecuados. En otro ejemplo, además de o en lugar de crear zonas de defecto, estos mecanismo también se usan para incrementar localmente el esfuerzo en la pieza de trabajo en una o más ubicaciones claramente definidas más allá del umbral de fractura, que entonces también conduce a inicio controlado de la fractura. En aún otro ejemplo, los defectos o zonas estructuralmente más débiles se crean artificialmente en la pieza de trabajo antes de que se induzca el esfuerzo en la pieza de trabajo, o en tanto que aún se está acumulando el esfuerzo. Con este último ejemplo se logra un mejor control de la ubicación en la pieza de trabajo donde empezará el proceso de fractura. En aún otro ejemplo, se prefiere crear un defecto o zona débil que tiene una geometría específica predefinida, puesto que, por ejemplo, las esquinas agudas (tal como las que resultan de la grabación con KOH anisotrópico en silicio monocristalino) se conoce que tienen frecuentemente fuerza de ruptura suficientemente reducida en comparación a la fuerza de ruptura del material de volumen.

En otro ejemplo, es deseable proporcionar condiciones físicas no homogéneas dentro de la capa auxiliar después de que la capa delgada se ha dividido de la pieza de trabajo (con la capa auxiliar que se adhiere a la capa delgada). Esto facilita el manejo y el procesamiento adicional de la capa delgada y la capa auxiliar de adhesión, y reduce el riesgo de romper la capa delgada después de que se ha dividido. Por ejemplo, si se usa enfriamiento para inducir esfuerzo en la estructura compuesta que consiste en la pieza de trabajo y la capa auxiliar que se adhiere, entonces, después de dividir la capa delgada de la pieza de trabajo, la estructura compuesta que consiste en la capa delgada y la capa auxiliar de adhesión aún está bajo esfuerzo interno, y en algunos ejemplos, se prefiere calentar este producto compuesto (capa delgada-capla auxiliar) a fin de reducir ese esfuerzo antes de que se presente el procesamiento adicional. Sin embargo, durante esta etapa de calentamiento, en algunos ejemplos, es preferible proporcionar condiciones físicas no homogéneas apropiadas dentro de la capa auxiliar: por ejemplo, si la capa auxiliar comprende un polímero que tiene un CTE sustancialmente mayor que el CTE de la capa delgada y si ese polímero está a una temperatura, antes de que empiece el calentamiento, por debajo o sustancialmente próxima a su temperatura de transición vítrea, entonces durante el calentamiento el polímero se expande sustancialmente (mucho más que la capa delgada), y para ciertos polímeros tal como PDMS, la rigidez (es decir, el módulo elástico) del polímero disminuye de forma sustancial. Por lo tanto, en este ejemplo, si el calentamiento se presenta preferentemente en partes de la capa auxiliar que están más próximas a la interfaz entre la capa auxiliar y la capa delgada, en tanto que las partes de la capa auxiliar que están lejos de esta interfaz permanecen más frías, entonces

las partes de la capa auxiliar que están más próximas a la interfaz se expanden más y se llegan a ser relativamente más blandas (es decir, módulo elástico menor), en tanto que las partes de la capa auxiliar que están más lejos de la interfaz (y más frías) permanecen más contraídas y más rígidas. Esto puede conducir a flexión excesiva del producto compuesto (capa delgada-capas auxiliar) durante el calentamiento, que a su vez puede conducir a ruptura (formación de grietas perpendiculares a la interfaz) de la capa delgada. Por otra parte, si, en este ejemplo, se presenta el calentamiento preferentemente en partes de la capa auxiliar que están adicionalmente lejos de la interfaz entre la capa auxiliar y la capa delgada, entonces las partes de la capa auxiliar que están más próximas a esta interfaz permanecen más frías, entonces las partes de la capa auxiliar que están más alejadas de la interfaz se expanden más y llegan a ser relativamente más blandas (es decir, menor módulo elástico), en tanto que las partes de la capa auxiliar que están más próximas a la interfaz permanecen más contraídas y son más rígidas. Este segundo caso da por resultado una flexión sustancialmente menor del producto compuesto (capa delgada-capas auxiliar), y también riesgo sustancialmente reducido de ruptura de la capa delgada. Se logra una distribución no homogénea de la temperatura (y de la rigidez) en la capa auxiliar tal como la descrita en este segundo caso, por ejemplo, al calentar preferentemente la cara de la capa auxiliar opuesta a la interfaz con la capa delgada, que se logra, por ejemplo, al colocar el producto compuesto (capa delgada-capas auxiliar) en una placa caliente (es decir a una temperatura de, por ejemplo, 100°C para una capa auxiliar que comprende PDMS) con la capa auxiliar que da hacia abajo hacia la placa caliente. En este ejemplo, se prefiere usar una capa auxiliar con una conductividad térmica relativamente baja, tal como una capa auxiliar que comprende PDMS. En otro ejemplo, las partes interiores de la capa auxiliar permanecen relativamente más frías, más rígidas y más contraídas, en tanto que las otras partes de la capa auxiliar se expanden más y resultan relativamente más blandas (creando de este modo, por ejemplo, una capa auxiliar con un “núcleo más rígido”). Por ejemplo, esto se logra al usar una capa auxiliar con una conductividad térmica relativamente baja y calentando fuertemente el exterior de la capa auxiliar. Dependiendo de los esfuerzos residuales en el producto compuesto (capa delgada-capas auxiliar) después de que se divide de la pieza de trabajo, y en el procesamiento adicional deseado de la capa delgada, se pueden usar diferentes ejemplos de estas condiciones físicas no homogéneas dentro de la capa auxiliar.

En otro ejemplo, las condiciones físicas no homogéneas predefinibles dentro de la capa auxiliar se pueden crear a fin de controlar la producción de estructuras localmente definibles en la superficie de la capa delgada producida del material en estado sólido. Por ejemplo, se conoce que la dependencia de los sistemas bimateriales en el módulo elástico no dimensional, para problemas de valor límite preescrito por tracción, se pueden expresar en términos de dos parámetros bimateriales, Sigma, la relación de rigidez de los dos materiales, y Epsilon, el índice oscilatorio. También se conoce que para un sistema bimaternal que consiste en una pieza de trabajo de un material y una capa auxiliar de un segundo material (que toma cada material que es isotrópico y linealmente elástico, con una grieta o fractura semiinfinita preexistente en la pieza de trabajo paralela a la interfaz, y la pieza de trabajo y la capa auxiliar asumidas infinitamente largas) la solución de estado estable del problema de fraccionamiento (por ejemplo, el espesor de la capa delgada producida) depende sustancialmente del espesor de la capa auxiliar así como de la relación de rigidez Sigma, pero sólo débilmente el índice oscilatorio beta. Por lo tanto, en un ejemplo de una forma de realización de la presente invención, las variaciones localmente definidas y relativamente grandes en el espesor de la capa delgada producida se logran al variar localmente el espesor de la capa auxiliar y/o su rigidez. También, al variar localmente el índice oscilatorio se permite modificar las propiedades locales (por ejemplo, periodo o amplitud) de estructuras sustancialmente periódicas, relativamente más pequeñas (en términos de variación del espesor, es decir, la amplitud), que se producen en la superficie de la capa delgada por comportamiento oscilatorio en la punta de la grieta o fractura. Por ejemplo, una capa auxiliar que comprende sustancialmente PDMS (con un espesor preferentemente entre 10 y 5000 micrómetros), que se está adhiriendo a una pieza de trabajo que consiste de una oblea de silicio monocristalino (con un espesor preferentemente entre 10 y 5000 micrómetros), se modela localmente (por ejemplo, al cortar la superficie del PDMS con una cuchilla filosa, a profundidades preferentemente entre 1 micrómetro y el espesor completo de la capa auxiliar). De esta manera, el espesor local y/o las propiedades elásticas locales de la capa auxiliar se modifican. Mediante la división subsiguiente (fraccionamiento) de acuerdo a las formas de realización de la presente invención, se producen de esta manera capas delgadas de silicio (que tiene espesores entre 10 y 500 micrómetros) con superficies estructuradas localmente definibles. En estas capas delgadas de silicio, por ejemplo, las características de superficie-estructura producidas tienen dimensiones laterales que varían desde significativamente por debajo de un milímetro hasta varios centímetros. Las alturas de estas características (es decir, el espesor local de la capa delgada en la característica) se puede controlar desde cero (es decir, un orificio correspondientemente formado en la capa delgada) a por encima de varios cientos de micrómetros, dependiendo también de las dimensiones laterales de la característica. Adicionalmente, cada una de estas características “macroscópicas” se pueden proveer adicionalmente con la elección de patrones específicos de rugosidad superficial “microscópica”, donde estos patrones microscópicos consisten de, o incluyen estructuras sustancialmente periódicas tal como líneas, valles, borde, etc., que tiene dimensiones verticales y laterales que varían desde por debajo de 100 nanómetros a por encima de varios micrómetros, y periodos espaciales que varían desde por debajo de 100 nanómetros a varias decenas de micrómetros.

En otro ejemplo, el espesor de la capa delgada producida del material en estado sólido se puede variar al variar el espesor de la capa auxiliar y/o el módulo elástico de la capa auxiliar. Por ejemplo, si se usa una capa auxiliar con un módulo elástico relativamente pequeño, se necesita una capa auxiliar relativamente gruesa para inducir suficiente esfuerzo en la pieza de trabajo para dividir una capa delgada de material en estado sólido. Puesto que para una capa auxiliar relativamente gruesa, las pequeñas variaciones absolutas en el espesor de la capa auxiliar (por

ejemplo, debido a procesos inexactos de producción, tal como errores aleatorios en la cantidad de material de capa auxiliar que se está depositando en la pieza de trabajo, por ejemplo, por depósito por aspersión) dan cuenta de variaciones comparativamente pequeñas relativas de espesor, las variaciones relativas resultantes del espesor en la capa delgada producida de material en estado sólido también son comparativamente pequeñas (en comparación al caso de usar una capa auxiliar más delgada con un módulo elástico más grande). Adicionalmente, de una manera similar, usando una capa auxiliar relativamente gruesa (con un módulo elástico correspondiente más pequeño) también se reducen los efectos de las áreas pequeñas de variación local indeseada en las propiedades del material dentro de la capa auxiliar en el espesor de la capa delgada producida. Por lo tanto, en estos ejemplos, se prefiere el uso de una capa auxiliar con un módulo elástico relativamente pequeño en términos de lograr un mejor control sobre el espesor de la capa delgada producida de material en estado sólido. Por ejemplo, una capa auxiliar que comprende sustancialmente PDMS con un espesor entre aproximadamente 0,1 y 1 mm se puede usar para producir capas delgadas (que tienen espesores entre aproximadamente 50 y 300 micrómetros) de obleas de silicio monocristalino (que tienen espesores entre 0,2 y 1 mm), sin embargo, una capa auxiliar que comprende sustancialmente aluminio requiere un espesor entre 5 y 100 micrómetros para producir las mismas capas delgadas de silicio monocristalino. Puesto que para PDMS se usa una capa auxiliar mucho más gruesa, el proceso es, en este ejemplo, más fácil de controlar para PDMS que para aluminio.

Finalmente, en algunos ejemplos, se pueden combinar los aspectos de cualquiera o todos los ejemplos anteriores.

En particular, la presente invención también se refiere a un procedimiento para producir hojas o discos delgados (obleas) de materiales semiconductores mono- o policristalinos. La presente invención se refiere en particular a todas las aplicaciones, donde se necesiten o sean deseables discos delgados de silicio mono- o policristalino (por ejemplo, debido a razones de costo). Las posibles aplicaciones incluyen la producción de celdas solares de silicio mono- o policristalino, efectivas en el coste y eficientes, así como componentes electrónicos mecánicamente flexibles y circuitos. Por ejemplo, usando el presente procedimiento, es posible dividir discos de aproximadamente 50 micrómetros de grueso de una oblea de silicio monocristalino o de un lingote de silicio truncado, en paralelo a su superficie.

Una ventaja significativa de la invención está en la presente en que el presente procedimiento reduce significativamente la pérdida de material que se presenta durante la producción de hojas delgadas de materiales que tienen baja conductividad, tal como por ejemplo, silicio. En contraste a los procedimientos anteriores, tal como por ejemplo, corte con sierra, molienda, pulido, o grabado, el presente procedimiento casi no incurre en pérdida de materia prima valiosa. Cuando se dividen los discos, hojas o cubiertas de la pieza de trabajo, la materia prima se llega a distribuir casi completamente a los discos divididos y al resto de la pieza de trabajo.

Una ventaja adicional de la invención es que es más rápida la producción de hojas muy delgadas (espesor menor de aproximadamente 100 micrómetros) y es menos intenso en labor que los procedimientos anteriores, tal como por ejemplo, molienda y pulido.

Otra ventaja de la invención es que el presente procedimiento, en comparación a los procedimientos anteriores, requiere equipos significativamente menos costoso y menos materiales consumibles, costosos para su ejecución. El presente procedimiento se puede integrar muy fácilmente como un subconjunto en los procedimientos existentes de producción, por ejemplo, para la producción de obleas delgadas de silicio o celdas solares. El presente procedimiento proporciona una manera simple para una utilización más eficiente de la materia prima que con los procedimientos anteriores. En consecuencia, llega a ser posible la producción de un número más grande de discos, hojas o cubiertas delgadas utilizables de una pieza de trabajo de un tamaño dado.

Finalmente, una ventaja de la invención es que el procedimiento descrito se puede aplicar a muchos tipos diferentes en materiales de pieza de trabajo (por ejemplo, para zafiro que se puede usar por ejemplo para producir LED, o para germanio que se puede usar, por ejemplo, para producir celdas solares "en tándem" de múltiples uniones).

Tercera forma de realización Independiente (Figura 3)

De acuerdo a un aspecto diferente de la presente invención, ésta se refiere a un procedimiento independiente para producir capas independientes, delgadas de materiales en estado sólido con estructuras de superficie. Las siguientes formas de realización ilustrativas de la invención se describen con referencia en la Figura 3.

En una primera forma de realización, la pieza de trabajo, 2 es una oblea de silicio monocristalino, comercialmente disponible. La figura 3 presenta esquemáticamente una secuencia representativa de proceso de acuerdo con la invención, en cuatro etapas (de la parte superior al fondo), en la vista en perspectiva. En lo siguiente se hace referencia a la figura 3.

Etapa 1: La materia prima básica es una oblea 2 de silicio monocristalino, producida de acuerdo con el procedimiento de Czochralski como se usa, por ejemplo, en la industria microelectrónica o fotovoltaica. La oblea 2 tiene un diámetro de aproximadamente 76 mm y un espesor de aproximadamente 0,4 mm. La oblea está ligeramente impurificada con n o p, tiene una resistividad eléctrica específica de aproximadamente 10 ohmios-cm, y

5 sus dos caras 1a y 1b están orientadas paralelas a un plano cristalino <100>. Una o ambas caras 1a y/o 1b de la oblea se pueden pulir tipo espejo o simplemente se graban y pliegan. La oblea 2 se puede usar directamente de la producción de la oblea, o se puede prelimpiar de manera burda usando procedimientos convencionales (por ejemplo, con solventes orgánicos y agua, o por limpieza con oxidación de plasma).

10 Etapa 2: En cada cara 1a y 1b de la oblea 2, se aplica una capa delgada 3a y 3b de polidiorganosiloxano (por ejemplo, polidimetilsiloxano, o PDMS; los análisis siguientes se refieren a PDMS por conveniencia, pero se debe entender que se puede emplear cualquier copolímero o polímero de silicio adecuado) y se cura (o se deja curar). Los espesores preferidos de estas capas auxiliares 3a y 3b están entre 0,01 mm y 10 mm, con un espesor de entre 15 aproximadamente 0,3 mm y aproximadamente 3 mm que es el más preferido. Los espesores de las dos capas 3a, 3b son los mismos en esta forma de realización ilustrativa, pero en otras formas de realización, pueden diferir los espesores de las dos capas. Para el PDMS, es posible usar, por ejemplo, SYLGARD 184 de Dow Corning, con una relación de mezclado de 1:10 entre el agente de curación, y el material base. La mezcla líquida de de PDMS se desgasifica primero durante aproximadamente 1 hora en vacío, luego se aplica en cada cara 1a, 1b de la oblea 2 en el espesor deseado, y se cura en una placa caliente (por ejemplo, durante 30 minutos a 100°C). En esta forma de realización ilustrativa, las capas 3a, 3b de PDMS tienen espesores homogéneos sobre la mayoría del área de la oblea. Esto se puede lograr al poner la oblea en una superficie horizontal y al dejar que el PDMS llegue al equilibrio por gravedad antes de curarlo. Después de que se cura el PDMS, el producto compuesto de 3 capas (PDMS 3a – oblea 2 – PDMS 3b) se enfría hasta temperatura ambiente. Después de esto, cualquier PDMS que sobresale a lo 20 largo de la circunferencia de la oblea 2 se remueve por una cuchilla filosa, tal que el borde de la oblea 2 está esencialmente libre de PDMS, y el PDMS cubre sólo las dos caras 1a y 1b de la oblea 2. Es posible evitar tener cualquier saliente de PDMS sobre la circunferencia de la oblea (y de esta manera tocar el borde de la oblea) al aplicar el PDMS a la cara de la oblea cuidadosamente y al dejarla llegar al equilibrio en una superficie horizontal; de esta manera, la tensión superficial del PDMS se impedirá que se desborde sobre los bordes de la oblea.

25 Etapa 3: Entonces, el producto compuesto (PDMS 3a – oblea 2 – PDMS 3b) se sumerge completamente en un baño de nitrógeno líquido (temperatura de aproximadamente -200°C). Debido a los coeficientes de expansión térmica fuertemente diferentes del silicio (aproximadamente $3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) y del PDMS (aproximadamente $300 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), se inducen grandes esfuerzos mecánicos en el producto compuesto por este enfriamiento. Después de unos pocos segundos de enfriamiento, la oblea 2 se divide en forma espontánea, paralela a su superficie 1a, en dos discos 5 30 delgados de silicio monocristalino. Con el cuidado adecuado, cada uno de los dos discos 5 de silicio consisten esencialmente de una pieza individual, con un lado de cada disco 5 que tiene aún la capa 3a o 3b auxiliar correspondiente de PDMS que se adhiere. A fin de evitar la ruptura adicional perpendicular a la superficie 4, el disco 5 se puede transferir, después de la división, directamente del baño de nitrógeno líquido sobre una placa caliente a 35 100°C (con el lado que tiene la capa auxiliar 3a o 3b de PDMS adherido dando hacia abajo) hasta que la capa auxiliar de PDMS, completa, se ha calentado nuevamente a al menos temperatura ambiente. No importa que procedimiento de calentamiento se emplee, se prefiere que los discos 5 se presionen cuidadosamente contra un soporte plano conforme se calientan de modo que se invierta cualquier ondulación de las capas, para aplanar las capas conforme prosigue el calentamiento.

40 Etapa 4: Finalmente, se forma una etapa de modelado en una o ambas de las capas auxiliares 3a y/o 3b de PDMS: Se usa un haz láser para cortar un patrón arbitrario 6 de líneas y/u otras figuras geométricas (tal como círculos, etc.), en la superficie de una o ambas de las capas 3a y/o 3b de PDMS. En esta forma de realización, todos los cortes se extienden completamente a través del espesor completo de las capas 3a y/o 3b correspondientes de PDMS, es decir, en las “aberturas de máscara” el PDMS se remueve localmente (se quema) completamente, revelando la 45 superficie de los discos 5 delgados subyacentes de silicio. El láser tiene de manera preferente una frecuencia que se absorbe fuertemente por el PDMS (un láser de CO₂ cumple con este criterio), y de manera preferente la intensidad y el movimiento del haz sobre las capas de PDMS (3a y/o 3b) se controla de una manera automatizada o manual para cortar un patrón deseado. Son aceptables cortadores láser comercialmente disponibles (por ejemplo VERSA LASER 50 VLS 6.60, con láser de CO₂ de 60 Vatios).

55 Las características en el patrón o modelo 6 que tiene dimensiones laterales mayores de aproximadamente 0,1 mm se pueden crear en las capas 3a y/o 3b de PDMS. Se prefiere extraer el material de PDMS quemado posiblemente restante dentro de las aberturas 6 de máscara al usar una solución limpiadora líquida tal como un grabador, por ejemplo, al enjuagar con una solución que contiene ácido hidrofúrico (HF).

60 Los discos 5 delgados de silicio con máscaras modeladas adherentes (capas auxiliares 3a y/o 3b) producidas de acuerdo a este procedimiento consisten sustancialmente de silicio monocristalino con las mismas propiedades como la oblea original 2. Las máscaras modeladas adherentes 3a y/o 3b entonces se pueden usar para crear estructuras localmente definidas en la superficie de los discos 5 delgados de silicio. Se puede lograr la formación de estas estructuras usando procesos aditivos apropiados donde se formen o depositen materiales adicionales a través de las aberturas 6 de máscara en la superficie de los discos 5 delgados de silicio, por ejemplo, por depósito de vapor físico, implantación iónica, oxidación local, depósito de vapor químico, epitaxia, electrochapeado, o depósito electroforético, etc. La etapa de formación de la estructura también puede comprender procesos sustractivos donde las estructuras 65 de superficie tal como zanjas, mesetas o pirámides se crean a través de las aberturas 6 de máscara al formar el material en la superficie del disco 5 delgado de silicio en sí mismo, por ejemplo, por grabado anisotrópico seco (por

ejemplo, RIE) o húmedo (por ejemplo, KOH) o isotrópico (por ejemplo, basado en HF).

Después del proceso de formación de estructuras, las capas auxiliares 3a o 3b de PDMS se pueden extraer opcionalmente de los discos 5 de silicio, por ejemplo, por inmersión en un grabador líquido apropiado (por ejemplo, una mezcla 3:1 en volumen de NMP (N-metilpirrolidona) y TBAF/THF (fluoruro de tetrabutilamonio, solución 1,0 M en tetrahidrofurano), o también por inmersión en ácido hidrofúorídico). Una manera preferida para extraer las capas auxiliares 3a o 3b de PDMS es al enjuagar con, o por inmersión en un baño de, grabador de ácido sulfúrico caliente (H_2SO_4), de manera preferente a una temperatura por encima de 150°C (y de manera más preferente por encima de 200°C), luego removiendo la espuma blanca de sílice producida de forma mecánica (por ejemplo, usando un cepillo, y posiblemente varios ciclos de cepillado-grabado), y finalmente limpieza del disco 5 de silicio por inmersión en ácido hidrofúorídico.

De acuerdo con las formas de realización de este aspecto independiente de la presente invención, se mejora la producción de capas independientes, delgadas de materiales en estado sólido con estructuras de superficie el combinar la producción de las capas con ciertas etapas de proceso para la producción previamente separada de estructuras de superficie, en particular, con etapas de proceso que se refieren al depósito y modelado de una máscara en la superficie de las capas para la formación subsiguiente de estructuras de superficie localmente definibles. Las formas de realización de la invención proporcionan un proceso simple y barato que circunscribe la mayoría de las desventajas identificadas anteriormente. Las formas de realización de la invención pueden producir capas independientes, delgadas de materiales en estado sólido con estructuras de superficie localmente definibles que pueden comprender materiales adicionales de estado sólido.

En varias formas de realización, se producen capas independientes, delgadas de materiales en estado sólido al inducir esfuerzos localmente controlables en el material en estado sólido. Estos esfuerzos se inducen al establecer esfuerzos localmente controlados en una capa auxiliar que se adhiere al material en estado sólido. La capa auxiliar se puede unir a una pieza de trabajo de material en estado sólido a través de adhesión suficientemente fuerte. Bajo condiciones apropiadas, los esfuerzos mecánicos conducen a la división de una capa delgada de la pieza de trabajo, en paralelo a la interfaz entre la pieza de trabajo y la capa auxiliar, con la capa auxiliar que se adhiere aún a la capa delgada dividida. La capa auxiliar entonces se modela y se usa como una máscara, es decir, el material de la capa auxiliar se remueve selectivamente en ciertas áreas (por ejemplo, por fotolitografía) a fin de formar un patrón de aberturas de máscara. A través de estas aberturas en la capa auxiliar se pueden formar estructuras localmente definibles en la superficie subyacente de la capa delgada de material en estado sólido por varias técnicas bien conocidas, por ejemplo, por depósito de vapor físico.

La capa auxiliar misma se prepara de una manera tal que permite que se induzcan esfuerzos localmente controlados. Por ejemplo, la capa auxiliar puede comprender un material con un coeficiente relativamente alto de expansión térmica (CTE). Si la capa auxiliar se adhiere a una pieza de trabajo cuyo CTE es sustancialmente menor, y si la estructura compuesta (capa auxiliar-pieza de trabajo) se somete a un cambio de temperatura, entonces se pueden inducir grandes esfuerzos en la pieza de trabajo, que conducen a la división de una capa delgada de la pieza de trabajo.

Por ejemplo, la pieza de trabajo puede consistir de silicio con un CTE de aproximadamente $3 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ a temperatura ambiente, y la capa auxiliar puede comprender un polímero caracterizado por un CTE que es mayor que aproximadamente $10 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ a temperatura ambiente. De manera preferente, el polímero se caracteriza por un CTE que es mayor que aproximadamente $50 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ a temperatura ambiente y de manera más preferente, el polímero se caracteriza por un CTE que es mayor que aproximadamente $200 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ a temperatura ambiente. En un ejemplo, la capa auxiliar consiste de polidimetilsiloxano reticulado (PDMS), que tiene un CTE de aproximadamente $300 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ a temperatura ambiente.

En otro ejemplo, la capa auxiliar puede comprender un material (por ejemplo, un metal o un plástico) caracterizado por un CTE que es diferente del CTE de la pieza de trabajo por un valor absoluto de al menos $10 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ a temperatura ambiente, de manera preferente por un valor absoluto de al menos $50 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ a temperatura ambiente, de manera aún preferente por un valor absoluto de al menos $100 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ a temperatura ambiente, y de manera más preferente por un valor absoluto de al menos $200 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ a temperatura ambiente. Por ejemplo, para una pieza de trabajo de silicio que tiene un CTE de aproximadamente $3 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ a temperatura ambiente se puede usar una capa auxiliar que comprende aluminio que tiene un CTE de aproximadamente $24 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ a temperatura ambiente.

En aún otro ejemplo, se pueden usar propiedades locales del material diferentes del CTE local para crear patrones de esfuerzo localmente controlables en la capa auxiliar, por ejemplo, por abultamiento local.

También, a fin de crear esfuerzos suficientemente grandes, se requiere una capa auxiliar con un módulo de corte relativamente grande. Adicionalmente, la fuerza de fractura del material de capa auxiliar tiene que ser suficientemente grande (en comparación a la fuerza de fractura del material de pieza de trabajo) a fin de evitar la fractura de la capa auxiliar en lugar de la pieza de trabajo. Sin embargo, en algunos ejemplos, puede ser deseable usar una capa auxiliar inductora de esfuerzo que comprende materiales baratos y poco contaminantes tal como polímeros, en particular materiales que, bajo condiciones normales, tengan un módulo elástico relativamente

pequeño (por ejemplo, más pequeño que 100 MPa, posiblemente más pequeño que 10 MPa, o aún más pequeño que 1 MPa) y/o pequeña fuerza de fractura (por ejemplo, menor que $5 \text{ MPa m}^{1/2}$, posiblemente más pequeña que $2 \text{ MPa m}^{1/2}$, o aún más pequeña que $1 \text{ MPa m}^{1/2}$). Por lo tanto, en algunos ejemplos, se usa una capa auxiliar heterogénea que comprende diferentes materiales, donde un material tiene un módulo elástico relativamente grande pero no necesariamente una gran fuerza de fractura, y otro material tiene una fuerza relativamente grande de fractura pero no necesariamente un módulo elástico grande. En otros ejemplos, se usa una capa auxiliar homogénea que comprende sustancialmente un material único y se proporcionan condiciones físicas tal que las propiedades pertinentes de este material tal como fuerza de fractura y/o módulo elástico varíen dependiendo de la posición dentro de la capa auxiliar (por ejemplo, establecer una distribución no homogénea de temperatura en una capa auxiliar cuyo módulo elástico depende de la temperatura).

Bajo condiciones apropiadas, los patrones inducidos de esfuerzo mecánico conducen a la división de una capa delgada de la pieza de trabajo, en paralelo a la interfaz entre la pieza de trabajo y la capa auxiliar.

El área de la capa delgada dividida del material en estado sólido corresponde aproximadamente al área de la capa auxiliar. Cada una de las dos superficies formadas cuando la capa delgada se divide de la pieza de trabajo se puede usar nuevamente, es decir, se puede aplicar otra capa auxiliar a la cara recién expuesta de la pieza de trabajo o a la cara recién expuesta de la capa dividida. De esta manera, las formas de realización de la presente invención facilitan las operaciones repetidas de división, tanto del resto de la pieza de trabajo como de una capa dividida, creando capas adicionales (y más delgadas) en las cuales entonces se pueden formar estructuras de superficies localmente definibles al usar las correspondientes capas auxiliares adherentes como máscaras, como se describirá en los siguientes párrafos. Finalmente, para algunos ejemplos de piezas de trabajo (por ejemplo, piezas de trabajo que consisten sustancialmente en una hoja delgada, por ejemplo, una oblea) puede ser beneficioso formar capas auxiliares en dos o más caras (posiblemente opuestas) de la pieza de trabajo o material en estado sólido, por ejemplo, a fin de mejorar la estabilidad y evitar la destrucción del resto de la pieza de trabajo.

La capa auxiliar se puede usar como una máscara de muchas maneras diferentes. En un ejemplo, la capa auxiliar se adhiere a la pieza de trabajo de material en estado sólido, entonces se inducen esfuerzos y una capa delgada de material en estado sólido se divide junto con la capa auxiliar, y finalmente, se corta un patrón de "aberturas de máscara" en la capa auxiliar. En este ejemplo, las aberturas de máscara son áreas donde el material de capa auxiliar se remueve localmente a través del espesor completo de la capa auxiliar que revela la capa delgada subyacente de material en estado sólido. Se pueden cortar aberturas de máscara en la capa auxiliar usando cualquier tecnología apropiada, también dependiendo del material de la capa auxiliar.

En un ejemplo, para una capa auxiliar que comprende sustancialmente un polímero, se cortan aberturas de máscara al irradiar la capa con un haz láser y al quemar el material de polímero en ubicaciones predefinidas, que comprenden posiblemente una etapa adicional donde el material quemado se extrae del resto de la capa auxiliar al usar una solución limpiadora líquida tal como un grabador. Por ejemplo, en una capa auxiliar que comprende sustancialmente PDMS se pueden cortar aberturas de máscara al irradiar con un láser de CO_2 y luego al extraer el material quemado al enjuagar con una solución que contiene ácido hidrofúrico (HF).

En otro ejemplo, se usa un procedimiento fotolitográfico, por ejemplo, una capa auxiliar fotoactiva se "expone" con el patrón deseado (por ejemplo, al irradiarlo selectivamente con el patrón deseado de luz ultravioleta) y luego al "revelado" (es decir, la parte expuesta o no expuesta de la capa auxiliar se graba de forma selectiva).

A pesar del procedimiento usado para cortar las aberturas de máscara, este proceso produce una máscara modelada o grabada con patrones en la capa delgada de material en estado sólido. Esta máscara modelada entonces se usa para crear estructuras localmente definidas en la superficie de la capa delgada. La formación de estas estructuras se puede lograr usando procesos aditivos apropiados donde se formen o depositen materiales adicionales (que pueden ser diferentes del material de la capa delgada) a través de las aberturas de máscara en la superficie de la capa delgada, por ejemplo, por depósito de vapor físico, implantación iónica, oxidación local, depósito de vapor químico, epitaxia, electrochapeado, o depósito electroforético, etc. La etapa de formación de estructuras también puede comprender procesos sustractivos donde se crean estructuras de superficie tal como zanjas, mesetas o pirámides a través de las aberturas de máscara al formar el material en la superficie de la capa delgada misma, por ejemplo, por grabado anisotrópico seco (por ejemplo RIE o húmedo (por ejemplo, KOH en silicio monocristalino) o isotrópico (por ejemplo, basado en HF), etc. Por ejemplo, se pueden usar soluciones acuosas que comprenden hidróxido de tetrametilamonio (TMAH), por ejemplo, concentraciones entre TMAH al 0,1-10 % en peso (de manera preferente, entre TMAH al 1-5 % en peso), a temperaturas entre 40-100°C (de manera preferente entre 70-90°C) para grabar de manera anisotrópica silicio monocristalino usando una capa auxiliar que comprende sustancialmente PDMS como la máscara, puesto que la velocidad de grabación del PDMS en ese grabador basado en TMAH es muy pequeña. Finalmente, también son posibles combinaciones de procesos aditivos y sustractivos para la formación de estructuras en la capa delgada.

En otro ejemplo, la capa auxiliar se puede usar como una máscara de una manera similar como se describe anteriormente, excepto que no se cortan las aberturas de máscara a través del espesor completo de la capa auxiliar, sino sólo a una cierta profundidad en la capa auxiliar, iniciando desde la interfaz entre la capa auxiliar y la capa

delgada de material en estado sólido. En otras palabras, se crea un patrón o modelo de túneles dentro de la capa auxiliar, donde el piso de estos túneles se proporciona por la superficie de la capa delgada de material en estado sólido, y las otras paredes de estos túneles se proporcionan por el material de la capa auxiliar. Estos túneles se pueden interconectar con otros túneles, y para cada sistema posiblemente interconectado de túneles se proporcionan al menos dos aberturas desde se puede acceder a los túneles desde el exterior de la estructura compuesta de capa auxiliar-capas delgadas. Estos túneles se pueden cortar en la capa auxiliar usando cualquier tecnología apropiada, dependiendo también del material de la capa auxiliar. Las dimensiones preferidas de estos túneles (por ejemplo, altura, diámetro, longitud) dependen del uso deseado de los túneles así como de la tecnología usada para crear estos túneles.

En un ejemplo, para una capa auxiliar que comprende un polímero que absorbe fuertemente luz en una parte del espectro electromagnético donde el material en estado sólido de la capa delgada es sustancialmente transparente, estos túneles se cortan por irradiación con un láser que tiene una frecuencia sustancialmente dentro de esa parte del espectro, de la siguiente manera: el haz láser se irradia en la capa auxiliar desde el lado donde se está adhiriendo la capa delgada de material en estado sólido, es decir, el haz láser se transmite primero a través de la capa delgada de material en estado sólido antes de que se absorba en la capa auxiliar. De esta manera, las partes de la capa auxiliar que están más próximas a la interfaz entre la capa auxiliar y la capa delgada de material en estado sólido se queman primero por el láser. En este ejemplo, puede ser preferible proporcionar medios para desfogar suficientemente los productos de combustión, por ejemplo, al mantener siempre al menos un extremo de los túneles abierto a la atmósfera, que se puede lograr, por ejemplo, al iniciar el corte de los túneles en el borde de la interfaz de la capa auxiliar-capas delgadas.

En otro ejemplo de una tecnología apropiada para cortar estos túneles, se usa un procedimiento fotolitográfico, donde se usa una capa auxiliar compuesta de dos capas que comprende una capa "interior" fotoactiva adherida a la capa delgada de material en estado sólido, y otra capa "exterior" no fotoactiva adherida a las caras opuestas de la capa fotoactiva. Esta capa auxiliar compuesta de dos capas entonces se "expone" con el patrón o modelo deseado (por ejemplo, al irradiarla con el patrón deseado de luz ultravioleta) y luego al "revelarla", por lo que se graban sólo las partes seleccionadas (ya sea partes expuestas o no expuestas, dependiendo del material fotoactivo) de la capa fotoactiva pero sustancialmente ninguna parte de la capa no fotoactiva, permitiendo crear los túneles deseados.

A pesar del procedimiento usado para cortar estos túneles, una vez que se crean se usan para crear estructuras localmente definidas en la superficie de la capa delgada de material en estado sólido (en los "pisos" de los túneles). Esto se puede hacer por procesos aditivos (por ejemplo, al hacer fluir un líquido de chapeado sin electrodos o electrochapeado a través de los túneles), procesos sustractivos (por ejemplo, al hacer fluir un grabador líquido a través de los túneles), y/o combinaciones de procesos aditivos y sustractivos. El flujo de los líquidos a través de un túnel se logra, por ejemplo, al proporcionar un suministro de líquido en un extremo del túnel y al aplicar un vacío en el otro extremo (o, más generalmente, al proporcionar un suministro de líquido en algunas de las aberturas exteriores en la red de túneles (posiblemente interconectados) y al aplicar vacío al resto de las aberturas).

Una ventaja de usar estos túneles (en lugar de aberturas de máscara a través del espesor completo de la capa auxiliar, como se describe anteriormente) es que, en principio, en cada túnel se puede usar un proceso diferente de formación de estructuras, que permite la aplicación simultánea de diferentes procesos de formación de estructuras en la capa delgada, usando sólo una máscara individual (por ejemplo, electrodeposición simultánea de diferentes materiales en diferentes túneles). Por ejemplo, de esta manera, se pueden crear diferentes estructuras de superficie localmente definibles que consisten de diferentes materiales, de una manera simultánea en la misma capa delgada de material en estado sólido, usando sólo una máscara individual.

En un ejemplo, algunos de los túneles en la capa delgada se rellenan con una solución que contiene un impurificador n (para el material de capa delgada), y otros túneles en la misma capa delgada se rellenan con una solución que contiene un impurificador p. Todos los túneles se rellenan en paralelo, y los impurificadores entonces se difunden simultáneamente a la capa delgada, por ejemplo, al calentar la estructura compuesta que incluye la capa auxiliar con túneles rellenos y la capa delgada adherente. De esta manera, se pueden crear patrones o modelos localmente definibles de áreas tanto n-impurificadas como p-impurificadas en la capa delgada de una manera simple y eficiente. Por lo tanto, el uso de estos túneles puede ser en muchos casos más rápido y más económico que procesos que usan máscaras convencionales, donde se requieren usualmente varias máscaras para crear estructuras de superficie que consisten de diferentes materiales. Además, la capa delgada de material en estado sólido con la capa auxiliar adherente que contienen estos túneles también se puede usar directamente en aplicaciones, por ejemplo, como un dispositivo microfluidico, por ejemplo para sensores o accionadores.

En otro ejemplo, se corta un patrón deseado de aberturas de máscara (completamente o parcialmente a través del espesor de la capa auxiliar) en la capa auxiliar antes de que la capa delgada de material en estado sólido se divida o separe del resto de la pieza de trabajo. En este ejemplo, las dimensiones locales y las profundidades (dentro de la capa auxiliar) de estas aberturas de máscara afectan el espesor local y las propiedades de superficie de la capa delgada producida del material en estado sólido. Bajo condiciones apropiadas, en la superficie de la capa delgada que estuvo dentro de la pieza de trabajo antes de la división o separación, se forma un patrón de estructuras de superficie, y ese patrón se dicta por el patrón de aberturas de máscara en la capa auxiliar.

Adicionalmente, al mismo tiempo se forma un patrón o modelo de estructuras de superficie en la cara de la pieza de trabajo que se llega a exponer nuevamente por la división o separación de la capa delgada, y este patrón es sustancialmente la imagen en el espejo (de manera más precisa, el complemento tridimensional) del patrón formado en la superficie de la capa desprendida. Además de estas estructuras de superficie que se crean por el proceso de división mismo, se pueden formar otras estructuras de superficie localmente definidas en la cara opuesta de la capa delgada del material en estado sólido (donde se está adhiriendo la capa auxiliar) al usar la capa auxiliar como máscara (por ejemplo, para depósito de materiales adicionales, o para grabado) de acuerdo a cualquiera de los ejemplos descritos anteriormente.

En otro ejemplo, algunas o todas las aberturas de máscara no se cortan a través del espesor completo de la capa auxiliar inicialmente sino sólo a una cierta profundidad. Sin embargo, después de la división o separación, estas aberturas de máscara entonces se extienden a través del espesor completo de la capa auxiliar, por ejemplo, al aplicar un proceso de grabado homogéneo a la superficie completa de la capa auxiliar a fin de reducir su espesor en todas partes hasta que las aberturas de máscara pasen a través de la superficie de la capa delgada del material en estado sólido.

En aún otro ejemplo, se imprime un patrón o modelo deseado de aberturas de máscara en la capa auxiliar antes de que la capa delgada del material en estado sólido se divida del resto de la pieza de trabajo, sin embargo, sin extraer ningún material de la capa auxiliar hasta después de la división. En un ejemplo, se expone una capa auxiliar fotoactiva usando el patrón deseado de aberturas de máscara antes de la división de la capa delgada de material en estado sólido, pero sólo revelada (donde realmente se remueve algo de material de la capa auxiliar) después de que la capa delgada se divide o separa. Una ventaja de este procedimiento es que permite realizar la exposición de la máscara (es decir, una etapa donde se puede necesitar una precisión relativamente alta y una buena alineación óptica) en tanto que aún está adherida la capa delgada a la pieza de trabajo que es más gruesa y de esta manera se puede manejar más fácilmente), y al mismo tiempo permite reducir de forma significativa los efectos mecánicos, posiblemente indeseados, descritos anteriormente, del patrón de aberturas de máscara en el espesor local de las propiedades de superficie de la capa delgada producida de material en estado sólido.

En otro ejemplo, también se puede usar la capa auxiliar como una clase de máscara de "depósito"; además de o en lugar de los usos de máscara descritos anteriormente, donde las aberturas de máscara definen áreas donde los procesos aditivos y/o sustractivos adicionales depositan subsiguientemente materiales sobre y/o graban el material de la capa delgada de material en estado sólido, la capa auxiliar misma también puede proporcionar al menos parte de los materiales que se van a depositar sobre la capa delgada o que se van a hacer reaccionar con los materiales de la capa delgada. En un ejemplo, la capa auxiliar comprende materiales que se usan como impurificadores para la capa delgada, y estos impurificadores se difunden ("impulsan") en la capa delgada, por ejemplo, al calentar la estructura compuesta que comprende la capa auxiliar y la capa delgada adherente. La difusión de los impurificadores se puede limitar localmente a ciertas áreas de la capa delgada, por ejemplo, al calentar sólo áreas seleccionadas de la estructura compuesta (por ejemplo, al irradiar sólo ciertas áreas de forma selectiva con un haz láser), al incluir el material impurificador predominantemente en ciertas áreas en la capa auxiliar, o al cortar partes seleccionadas de la capa auxiliar (por ejemplo, por cualquiera de los procedimientos descritos anteriormente para crear aberturas de máscara) antes de difundir el impurificador.

En lugar de o además de los impurificadores, la capa auxiliar puede comprender otros materiales (posiblemente también confinados sustancialmente sólo a ciertas áreas dentro de la capa auxiliar), que, de manera preferente por medio de un cierta etapa de "activación", "disparo" o fijación (por ejemplo, por calor, o por irradiación con onda electromagnéticas, etc.), pueden actuar de manera química y/o física en la capa auxiliar, la capa delgada de material en estado sólido, o ambos. En un ejemplo, los defectos e impurezas en una capa delgada que comprende silicio resultan pasivos al difundir hidrógeno de la capa auxiliar (que comprende, por ejemplo, un nitrato de silicio de PECVD de alto contenido de hidrógeno) en la capa delgada.

En otro ejemplo, se crean contactos eléctricos metálicos en la superficie de la capa delgada al disparar localmente una capa auxiliar que comprende una pasta metálica, por ejemplo, al irradiar áreas seleccionadas de la capa auxiliar con un láser. En otro ejemplo, se crean contactos eléctricos metálicos en la superficie de la capa delgada al formar en cenizas una capa auxiliar de polímero que comprende partículas metálicas, con las partículas metálicas que se funden localmente en la superficie de la capa delgada en estructuras metálicas que proporcionan contacto eléctrico a la capa delgada. Las partículas metálicas se pueden arreglar de manera no homogénea en la capa auxiliar de acuerdo al patrón de contacto deseado, o se pueden distribuir homogéneamente en la capa auxiliar y fundir selectivamente sólo en las áreas deseadas, por ejemplo, al irradiar con un láser. En otro ejemplo, se crean contactos eléctricos metálicos dentro de la capa auxiliar misma y/o conexiones eléctricas entre la capa auxiliar y la capa delgada, por ejemplo, usando una capa auxiliar que comprende un material no conductor, tal como un polímero, con partículas metálicas embebidas, dispuestas como patrones de altas y bajas concentraciones de partículas metálicas, que conducen a conductividad eléctrica localmente alta y baja, respectivamente. En otro ejemplo, los contactos eléctricos dentro de la capa auxiliar misma y/o las conexiones eléctricas entre la capa auxiliar y la capa delgada se crean usando una capa auxiliar que comprende un material no conductor, tal como un polímero, con túneles o canales embebidos o (microfluídicos) con un líquido eléctricamente conductor tal como un metal de bajo punto de

fusión, o una aleación (por ejemplo, aleación eutéctica de galio-indio). Estos túneles o canales se pueden crear, por ejemplo, al irradiar la capa auxiliar con un láser transmitido a través de la capa delgada como se describe anteriormente.

5 En otro ejemplo, se crean estructuras de superficie en la capa delgada al reaccionar de forma química uno o más materiales en la capa auxiliar con el material de la capa delgada en ciertas ubicaciones específicas en la interfaz entre la capa auxiliar y la capa delgada. Además, la irradiación de áreas seleccionadas de un patrón auxiliar fotoactivo con, por ejemplo, luz UV, puede crear localmente especies reactivas tal como radicales libres, ácidos, bases, etc., que, en la interfaz entre la capa auxiliar y la capa delgada, reaccionan localmente con la capa delgada para formar estructuras de superficie localmente definidas, por ejemplo, al grabar u oxidar localmente la capa delgada. En un ejemplo, estas reacciones se inducen sobre la interfaz completa entre la capa auxiliar y la capa delgada a fin de facilitar la deslaminación y la extracción de la capa auxiliar adherente. En otros ejemplos, estas reacciones químicas localmente definibles en la interfaz entre la capa auxiliar y la capa delgada se usan para producir, por ejemplo, un revestimiento antirreflexivo o protector en la capa delgada.

15 Las formas de realización de la presente invención también se refieren a la producción de capas independientes, delgadas de materiales en estado sólido con superficies estructuradas de materiales semiconductores mono- o policristalinos. La presente invención se puede desplegar donde se necesiten o se deseen discos delgados de silicio mono- o policristalino (por ejemplo, debido a consideraciones de coste), y donde se van a formar estructuras de superficie localmente definibles que comprenden también materiales diferentes de silicio, en al menos una cara de estos discos delgados. Las aplicaciones ventajosas incluyen la producción de celdas solares de silicio monocristalino, efectivas en el coste y eficientes, que tienen estructuras de superficie que actúan sustancialmente como contactos eléctricos, o estructuras para dispositivos microelectromecánicos en sustratos delgados mecánicamente flexibles. Por ejemplo, las formas de realización de la invención facilitan la división o separación, de una plancha plana de silicio monocristalino, de capas que tienen espesores de aproximadamente 50 μm , y que forman estructuras localmente definidas en la superficie de estas capas. En estas capas delgadas de silicio, por ejemplo, la invención facilita a la creación de características de estructuras de superficie que tienen dimensiones laterales que varían desde significativamente por debajo de 1 milímetro hasta varios centímetros.

30 Una ventaja principal de la invención está en la reducción significativa del número de etapas de procesamiento requeridos para producir capas independientes, delgadas de materiales en estado sólido con estructuras de superficie. En contraste a los procedimientos tradicionales, los procesos para cortar capas delgadas de una pieza más gruesa de material en estado sólido, y una mayoría de los procesos subsiguiente para formar estructuras de superficie controlables en estas capas (tal como pulido, limpieza, depósito de máscara, modelado de máscara, transferencia de máscara, remoción de máscara) se combinan todos en una secuencia individual, mucho más simple y significativamente menos costosa de proceso. Adicionalmente, el presente planteamiento reduce significativamente el coste de material que se presenta durante la producción de capas independientes, delgadas de materiales de este sólido con estructuras de superficie. En contraste a los procedimientos anteriores que emplean, por ejemplo, corte con sierra, molienda, pulido, o grabado, el presente planteamiento casi no incurre en pérdida de materia prima valiosa. Cuando se divide o se separa una capa delgada de una pieza de trabajo, la materia prima permanece casi completamente distribuida entre la capa dividida y el resto de la pieza de trabajo.

45 Otra ventaja de la invención es la capacidad para implementarla usando equipo significativamente menos costoso. Las formas de realización de la invención se pueden integrar fácilmente en los procedimientos existentes de producción, por ejemplo, para la producción de celdas solares, delgadas, de silicio con estructuras de superficie.

Finalmente, una ventaja de la invención es que se puede aplicar a muchos tipos diferentes de materiales en estado sólido.

50 En tanto que la invención se ha mostrado de forma particular y se ha descrito haciendo referencia a formas de realización específicas, los expertos en la materia apreciarán que se pueden introducir varios cambios en la forma y en el detalle de la misma sin apartarse del espíritu y el alcance de la invención como se define por las reivindicaciones adjuntas. El alcance de la invención de esta manera se indica por las reivindicaciones adjuntas y todos los cambios dentro del significado e intervalo de equivalencia de las reivindicaciones por lo tanto se propone que resulten comprendidos.

55

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de impresión que comprende las etapas siguientes: proporcionar un material en estado sólido (2) que presenta por lo menos una superficie expuesta (1a, 1b); aplicar una capa auxiliar (3a, 3b) a la superficie expuesta (1a, 1b) para formar una estructura compuesta; someter la estructura compuesta a unas condiciones que inducen un patrón de esfuerzo (6) en la capa auxiliar (3a, 3b) y en el material en estado sólido (2), facilitando así la fractura del material en estado sólido (2) a lo largo sustancialmente de un plano a una profundidad en el mismo; y extraer la capa auxiliar (3a, 3b) y, con la misma, una capa del material en estado sólido que termina en la profundidad de fractura, una superficie expuesta (4) de la capa extraída (5) del material en estado sólido (2) que presenta una topología superficial (7a, 7b) que corresponde al patrón de esfuerzo (6).
2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que por lo menos una de las propiedades del material de la capa auxiliar (3a, 3b) varía según un patrón (6) que depende de la posición en el interior de la capa auxiliar.
3. Procedimiento según la reivindicación 2, en el que la capa auxiliar (3a, 3b) es una estructura compuesta, o el que dicha por lo menos una de las propiedades de material de la capa auxiliar que varía según un patrón (6) afecta la magnitud, y/o la orientación de los esfuerzos locales inducidos cuando la capa auxiliar (3a, 3b) es sometida a unas condiciones inductoras de esfuerzo, o en el que dicha por lo menos una de las propiedades de material de la capa auxiliar que varía según un patrón afecta la dinámica de la propagación de fisuración durante la fractura del material en estado sólido, o en el que dicha por lo menos una de las propiedades de material de la capa auxiliar (3a, 3b) que varía según un patrón afecta la extensión a la que el volumen del material de la capa auxiliar cambia cuando se somete a las condiciones inductoras de esfuerzo, o en el que dicha por lo menos una de las propiedades de material de la capa auxiliar (3a, 3b) que varía según un patrón es el coeficiente de la expansión térmica (CTE), o en el que dicha por lo menos una de las propiedades de material de la capa auxiliar (3a, 3b) que varía según un patrón afecta la extensión a la que el material de la capa auxiliar (3a, 3b) se hincha cuando absorbe un solvente, o en el que dicha por lo menos una de las propiedades de material de la capa auxiliar que varía según patrón es un módulo elástico, o en el que dicha por lo menos una de las propiedades de material de la capa auxiliar (3a, 3b) que varía según un patrón es el espesor local de la capa auxiliar, o en el que dicha por lo menos una de las propiedades de material de la capa auxiliar (3a, 3b) que varía según un patrón es modificada localmente mediante por lo menos un dispositivo activo, en particular un accionador piezoeléctrico, que está incorporado localmente en la capa auxiliar, o en el que dicha por lo menos una de las propiedades de material de la capa auxiliar (3a, 3b) que varía según un patrón varía asimismo en el tiempo durante la ejecución del procedimiento.
4. Procedimiento según la reivindicación 1 o 2, en el que las condiciones inductoras de esfuerzo varían según un patrón que depende de la posición dentro de la capa auxiliar (3a, 3b).
5. Procedimiento según la reivindicación 1, 2 o 4, en el que las condiciones inductoras de esfuerzo afectan la magnitud y/o la orientación de los esfuerzos locales inducidos cuando la capa auxiliar (3a, 3b) es sometida a las condiciones inductoras de esfuerzo, o en el que las condiciones inductoras de esfuerzo afectan la dinámica de la propagación de fisuración durante la fractura de dicho material en estado sólido (2), o en el que las condiciones inductoras de esfuerzo realizan cambios del volumen del material de la capa auxiliar (3a, 3b).
6. Procedimiento según la reivindicación 4, en el que las condiciones inductoras de esfuerzo que varían según un patrón son unas temperaturas diferentes que son mantenidas en posiciones diferentes dentro de la capa auxiliar (3a, 3b) o en el que las condiciones inductoras de esfuerzo que varían según un patrón son unas concentraciones químicas diferentes que son mantenidas en posiciones diferentes dentro de la capa auxiliar (3a, 3b).
7. Procedimiento según la reivindicación 1, 2 o 4, en el que las condiciones inductoras de esfuerzo son unas fuerzas mecánicas externas que son aplicadas sobre la capa auxiliar (3a, 3b), o en el que las condiciones inductoras de esfuerzo afectan un módulo elástico de la capa auxiliar (3a, 3b), o en el que las condiciones inductoras de esfuerzo comprenden la absorción de un solvente mediante por lo menos parte de la capa auxiliar (3a, 3b).
8. Procedimiento según la reivindicación 4, en el que las condiciones inductoras de esfuerzo que varían según un patrón afectan por lo menos un dispositivo activo, en particular un accionador piezoeléctrico, que está embebido localmente capa auxiliar (3a, 3b).
9. Procedimiento según la reivindicación 1, 2 o 4, en el que las condiciones inductoras de esfuerzo varían en el tiempo durante la ejecución del procedimiento, que comprenden particularmente por lo menos un cambio en la temperatura impuesta a la capa auxiliar (3a, 3b), o que comprenden enfriar la capa auxiliar (3a, 3b) por debajo de la temperatura ambiente.
10. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que la fractura del material en estado sólido (2) es inducida a una profundidad en el material en estado sólido y sustancialmente a lo largo de un plano que es sustancialmente paralelo a la interfaz entre la capa auxiliar (3a, 3b) y el material en estado sólido (2).

11. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que la etapa de extracción revela una superficie expuesta nueva (4) del material en estado sólido (2) que presenta una topología superficial complementaria a la topología superficial de la capa extraída del material en estado sólido .
- 5 12. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicha por lo menos una superficie expuesta del material en estado sólido presenta una topología superficial preexistente, en particular en el que dicha por lo menos una superficie expuesta del material en estado sólido comprende unos dispositivos microelectrónicos y/o micromecánicos preexistentes.
- 10 13. Procedimiento según la reivindicación 1, que comprende además las etapas siguientes: aplicar una nueva capa auxiliar (3a, 3b) a la superficie expuesta de la capa extraída del material en estado sólido para formar una nueva estructura compuesta que consiste en la nueva capa auxiliar, la capa extraída de material en estado sólido , y la capa auxiliar previamente aplicada; someter la nueva estructura compuesta a condiciones que inducen un nuevo patrón de esfuerzo en la nueva capa auxiliar, en el material en estado sólido y en la capa auxiliar previamente aplicada, facilitando así la fractura de la capa extraída del material en estado sólido sustancialmente a lo largo de un plano a una nueva profundidad en la misma; y extraer la nueva capa auxiliar y con la misma, una nueva capa del material en estado sólido que termina en la nueva profundidad de fractura, una superficie expuesta de la nueva capa extraída de material en estado sólido que presenta una topología superficial que corresponde al nuevo patrón de esfuerzo.
- 15 20 14. Procedimiento según la reivindicación 11, que comprende además las etapas que consisten en: aplicar una nueva capa auxiliar (3a, 3b) a la nueva superficie expuesta al material en estado sólido para formar una nueva estructura compuesta; someter la nueva estructura compuesta a condiciones que inducen un nuevo patrón de esfuerzo en la nueva capa auxiliar y en el material en estado sólido, facilitando así la fractura del material en estado sólido sustancialmente a lo largo de un plano a una nueva profundidad en la misma; y extraer la nueva capa auxiliar y con esta, una nueva capa de material en estado sólido que termina en la nueva profundidad de fractura, una superficie expuesta de la nueva capa extraída del material en estado sólido que presenta una topología superficial que corresponde al nuevo patrón de esfuerzo.
- 25 30 15. Procedimiento según la reivindicación 1, que comprende las etapas que consisten en: proporcionar un material en estado sólido (2) que presenta al menos dos superficies expuestas (1a, 1b); aplicar una pluralidad de capas auxiliares (3a, 3b) a una pluralidad de dichas por lo menos dos superficies expuestas (1a, 1b), con una capa auxiliar separada (3a, 3b) para cada una de estas superficies expuestas (1a, 1b), para formar una estructura compuesta; someter la estructura compuesta a condiciones que inducen un patrón de esfuerzo (6) en la pluralidad de capas auxiliares (1a, 1b) y en el material en estado sólido (2), facilitando así la fractura del material en estado sólido, para cada capa auxiliar (3a, 3b), sustancialmente a lo largo de un plano a una profundidad en el material en estado sólido; y extraer la pluralidad de capas auxiliares, y con cada capa auxiliar, una capa del material en estado sólido que termina en la profundidad de fractura, para cada capa auxiliar, una superficie expuesta de la capa extraída del material en estado sólido que presenta una topología superficial que corresponde al patrón de esfuerzo (6) de esa capa auxiliar (3a, 3b), en particular en la que por lo menos dos de los planos de fractura coinciden sustancialmente, y la topología superficial de las capas extraídas correspondientes del material en estado sólido corresponde sustancialmente a las superposiciones de los patrones de esfuerzo de las capas auxiliares implicadas.
- 35 40 45 16. Procedimiento según la reivindicación 1 que comprende las etapas que consisten en: proporcionar un material en estado sólido (2) que presenta dos superficies expuestas sustancialmente paralelas y opuestas (1a, 1b); aplicar una capa auxiliar (3a, 3b) a cada una de las superficies expuestas para formar una estructura compuesta; someter la estructura compuesta a condiciones que inducen un patrón de esfuerzo (6) en las dos capas auxiliares (3a, 3b) y en el material en estado sólido, facilitando así la fractura del material en estado sólido sustancialmente a lo largo de un plano a una profundidad entre las dos superficies expuestas opuestas; y extraer las dos capas auxiliares (3a, 3b) y extraer con la primera capa auxiliar, una primera capa del material en estado sólido que termina en la profundidad de fractura, una superficie expuesta de la primera capa extraída de material en estado sólido que presenta una topología superficial que corresponde a una superposición del patrón de esfuerzo (6) de las dos capas auxiliares (3a, 3b), y extraer con la segunda capa auxiliar (3a, 3b), una segunda capa del material en estado sólido que es el complemento de la primera capa extraída del material en estado sólido con respecto al material en estado sólido inicialmente proporcionado (2), una superficie expuesta de la segunda capa extraída de material en estado sólido que presenta una topología superficial complementaria a la topología superficial de la primera capa extraída de material en estado sólido, en particular en el que proporcionar un material en estado sólido comprende proporcionar una estructura seleccionada de entre el grupo que consiste en un sustrato, una oblea, un chip, y un disco, en particular en el que proporcionar un material en estado sólido comprende proporcionar una estructura que comprende dispositivos microelectrónicos y/o micromecánicos preexistentes.
- 50 55 60 17. Procedimiento según la reivindicación 13, 15 o 16, en el que por lo menos una de las propiedades del material de por lo menos una de las capa auxiliares (3a, 3b) varía de acuerdo a cualquiera o la totalidad de los procedimientos según las reivindicaciones 2, 3, en particular en el que por lo menos una de las propiedades del material de por lo menos una de las capas auxiliares (3a, 3b) varía de acuerdo a un patrón (6) que es diferente del patrón de variación de la misma propiedad del material en por lo menos otra de las capa auxiliares, en particular según un patrón que es
- 65

sustancialmente el complemento del patrón de variación de la misma propiedad del material en por lo menos otra de las capas auxiliares.

5 18. Procedimiento según la reivindicación 13, 15 o 16, en el que las condiciones inductoras de esfuerzo varían de acuerdo con cualquiera o la totalidad de los procedimientos según las reivindicaciones 4, 5, 6, 7, 8, 9, en particular en el que para por lo menos una de las capas auxiliares (3a, 3b) las condiciones inductoras de esfuerzo varían de acuerdo con un patrón que es diferente al patrón de variación de las condiciones inductoras de esfuerzo en por lo menos otra de las capas auxiliares, en particular en el que las condiciones inductoras de esfuerzo varían de acuerdo con un patrón que es sustancialmente el complemento de un patrón de variación de las condiciones inductoras de esfuerzo en por lo menos otra de las capas auxiliares.

15 19. Procedimiento según la reivindicación 1, 15 o 16, en el que proporcionar un material en estado sólido (2) comprende proporcionar una estructura que comprende un material semiconductor, en particular una estructura que comprende silicio, germanio, zafiro, carburo de silicio, arseniuro de galio, nitruro de galio, óxido de cinc y/o cuarzo.

20 20. Procedimiento según la reivindicación 1, 15, o 16, en el que la aplicación de una o varias capas auxiliares (3a, 3b) comprende aplicar por lo menos una capa auxiliar que comprende un polímero, en particular que comprende un polidiorganosiloxano, o que comprende polidimetilsiloxano.

20 21. Procedimiento según la reivindicación 1, 15, o 16, en el que la aplicación de una o varias capas auxiliares (3a, 3b) comprende aplicar por lo menos una capa auxiliar que comprende un metal, en particular que comprende aluminio.

25 22. Procedimiento según la reivindicación 1, 15, o 16, en el que la aplicación de una o varias capas auxiliares (3a, 3b) comprende aplicar por lo menos una capa auxiliar que comprende una estructura compuesta que comprende un polímero y un no polímero y/o en particular que comprende estructuras de uno o más materiales inorgánicos embebidos en una matriz que comprende polidimetilsiloxano.

30 23. Procedimiento según la reivindicación 1, 15, o 16, en el que la aplicación de una o varias capas auxiliares (3a, 3b) comprende aplicar por lo menos una capa auxiliar caracterizada porque presenta un coeficiente de expansión térmica (CTE) que es diferente del CTE del material en estado sólido proporcionado por al menos $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

35 24. Procedimiento según la reivindicación 1, 15, o 16, en el que la fractura del material en estado sólido (2) se facilita además al proporcionar una o más zonas con rugosidad de fractura relativamente menor en el material en estado sólido antes de someter la estructura compuesta a condiciones que inducen esfuerzo o mientras se somete la estructura compuesta a condiciones inductoras de esfuerzo.

40 25. Procedimiento según la reivindicación 1, 15, o 16, en el que tras extraer la capa auxiliar (3a, 3b) y, con ésta, una capa del material en estado sólido, la capa auxiliar se extrae de la capa extraída del material en estado sólido.

40 26. Procedimiento según la reivindicación 1, 15, o 16, en el que la topología superficial producida corresponde sustancialmente a la topología de la superficie para la cual el factor KII de intensidad de esfuerzo vertical es cero dentro de la estructura compuesta.

45 27. Procedimiento según la reivindicación 1 o 15, en el que por lo menos una superficie expuesta a la cual se aplica una capa auxiliar (3a, 3b) presenta una curvatura.

50 28. Procedimiento según la reivindicación 1, 15, o 16, en el que la topología superficial producida presenta sustancialmente simetría especular, o comprende patrones sustancialmente periódicos, en particular patrones periódicos con períodos espaciales inferiores a 10 micrómetros.

55 29. Procedimiento según la reivindicación 12 o 16 o 13, en el que el patrón de esfuerzo se induce de manera que se minimiza el efecto que la topología superficial preexistente presenta sobre la topología superficial de la superficie expuesta de la capa extraída, en particular de manera que es minimizado el efecto que los dispositivos microelectrónicos y/o micromecánicos preexistentes presentan sobre la topología superficial de la superficie expuesta de la capa extraída, o en particular de manera que el efecto que la topología superficial de la superficie expuesta de la capa extraída presenta sobre la topología superficial de la capa expuesta de la nueva capa extraída es minimizado.

FIGURA 1

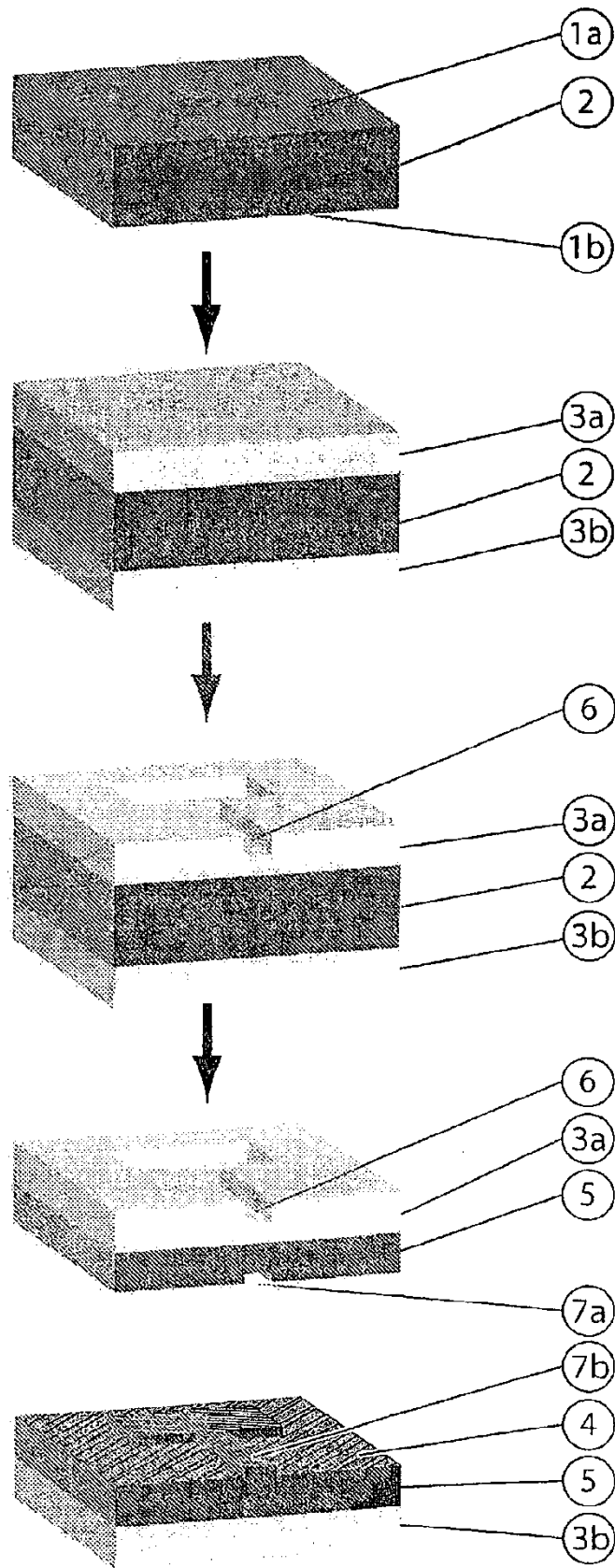


FIGURA 2

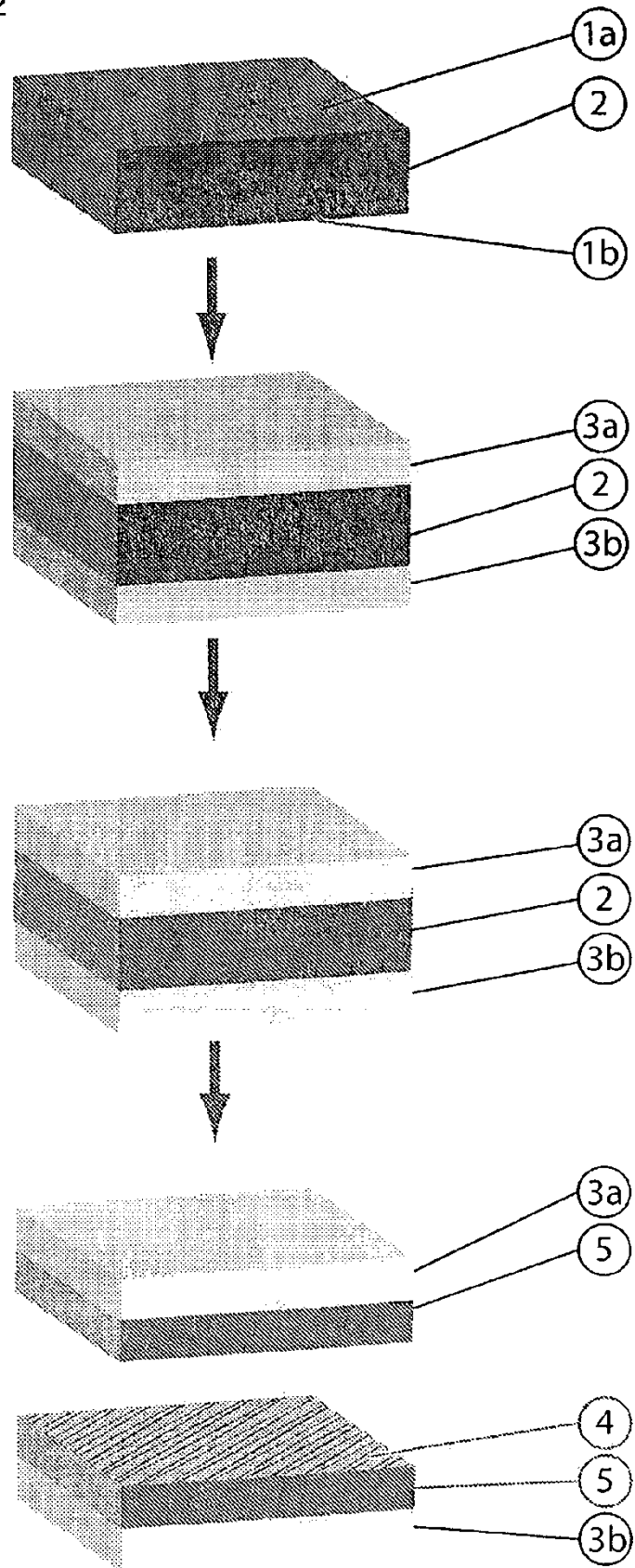


FIGURA 3

