

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 680 648**

51 Int. Cl.:

B29C 33/44	(2006.01)
C03B 19/02	(2006.01)
C30B 19/06	(2006.01)
C30B 29/06	(2006.01)
H01L 21/02	(2006.01)
H01L 31/18	(2006.01)
C30B 15/30	(2006.01)
C30B 11/00	(2006.01)
C30B 28/04	(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **09.03.2010 PCT/US2010/026639**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **16.09.2010 WO10104838**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **09.03.2010 E 10751275 (8)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **30.05.2018 EP 2406413**

54 Título: **Procedimientos de fabricación de cuerpos semiconductores delgados a partir de material fundido**

30 Prioridad:

28.08.2009 US 237965 P
09.03.2009 US 209582 P
10.07.2009 US 224730 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
10.09.2018

73 Titular/es:

1366 TECHNOLOGIES INC. (100.0%)
45 Hartwell Avenue
Lexington, MA 02421, FR

72 Inventor/es:

SACHS, EMANUEL, M.;
WALLACE, RICHARD, L.;
HANTSOO, EERIK, T.;
LORENZ, ADAM, M.;
HUDELSON, G. D., STEPHEN y
JONCZYK, RALF

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 680 648 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

Procedimientos de fabricación de cuerpos semiconductores delgados a partir de material fundido

Documentos relacionados

5 En el presente documento se reivindica la prioridad sobre la solicitud de patente provisional de los EE. UU. n.º 61/209,582, titulada "Procedimiento y aparato de fabricación de láminas semiconductoras delgadas a partir de material fundido", en nombre de Emanuel M. Sachs, Richard L. Wallace, Eerik T. Hantsoo y Adam M. Lorenz, presentada el lunes, 9 de marzo de 2009, y la solicitud de patente provisional de los EE. UU. N.º 61/224.730, titulada "Procedimiento de formación de oblea de silicio sin sangría", en nombre de Emanuel M. Sachs, Richard L. Wallace, Eerik T. Hantsoo y Adam M. Lorenz, presentada el 10 de julio de 2009, y la solicitud de patente provisional de los
10 EE. UU. N.º 61/237.965, titulada "Procedimientos de formación de oblea de silicio sin sangría", en nombre de Emanuel M. Sachs, Richard L. Wallace, Adam M. Lorenz, Eerik T. Hantsoo y George David Stefen Hudelson, presentada el 28 de agosto de 2009.

Introducción

15 Las invenciones desveladas en el presente documento son procedimientos de fabricar una lámina de silicio, que puede usarse más adelante como preforma que se recristaliza para producir un sustrato de alta calidad para la fabricación de células solares de silicio. Otras invenciones desveladas en el presente documento son procedimientos para fabricar una lámina de silicio delgada que puede usarse para la fabricación de células solares sin recristalización. Los procedimientos desvelados en el presente documento pueden usarse también para fabricar láminas delgadas a partir de materiales semiconductores fundidos distintos del silicio.

20 Se desvelan procedimientos en la solicitud de tratado de cooperación en materia de patentes n.º PCT/US2008/008030, titulado, "Recristalización de obleas de semiconductor en una cápsula de película delgada y procedimientos relacionados", presentada el jueves, 26 de junio de 2008, en nombre de Emanuel M. Sachs, James G. Serdy, y Eerik T. Hantsoo y el Instituto de tecnología de Massachusetts, designando a los Estados Unidos de América, y reivindicando también la prioridad sobre una solicitud de patente de los EE.UU., n.º US 60/937,129,
25 presentada el martes, 26 de junio de 2007. La tecnología desvelada en estas solicitudes puede usarse para recristalizar un semiconductor en una forma cristalina diferente y se refiere en el presente documento como tecnología de recristalización en una cápsula (RIC). Los procedimientos desvelados en el presente documento pueden usarse para fabricar la preforma de lámina semiconductor de material de partida, que se recristaliza más tarde usando tecnología RIC.

30 La arquitectura y esquemas de procedimiento determinados se desvelan en la solicitud de tratado de cooperación en materia de patentes n.º PCT/US2008/002058, titulado, "Célula solar con superficies texturizadas" presentado en: 15 de febrero de 2008, en nombre de Emanuel M. Sachs y James F. Bredt y el Instituto de tecnología de Massachusetts, designando a los Estados Unidos de América, y reivindicando también la prioridad sobre dos solicitudes de patente de los EE.UU., n.º US 60/901,511, presentada el 15 de febrero de 2007, y n.º US 61/011,933,
35 presentada el 23 de enero de 2008. La tecnología desvelada en estas solicitudes se denomina en el presente documento de manera colectiva tecnología de célula alineada por sí misma (SAC). Los procedimientos desvelados en el presente documento pueden usarse para fabricar obleas semiconductoras texturizadas para usar como pieza de trabajo de partida para células alineadas por sí mismas desvelada en la solicitud de patente de SAC.

40 Otro procedimiento para fabricar una lámina semiconductor se desvela en las solicitudes de patente WO2008/090864 A1 y JP 2003 226598 A.

Sumario

45 En una realización de un procedimiento desvelado en el presente documento mostrada en las figuras 3A, 3B, 3C y 3D, un elemento 13 fundido de silicio se mantiene y una lámina 5 fría de material refractario poroso, tal como grafito, se hace pasar sobre el elemento fundido de modo que el material refractario se pone en contacto con la parte superior del elemento fundido. Un vacío 17 se aplica a la parte superior de la lámina refractaria porosa para extraer la atmósfera ambiente de la lámina. Tras el contacto con el elemento fundido, tienen lugar dos eventos de manera esencialmente simultánea: 1) el silicio se congela sobre la superficie enfriada de la lámina refractaria porosa; y 2) el vacío sostiene el silicio con respecto a la lámina refractaria. El resultado es una lámina 19 delgada de silicio sobre un sustrato refractario frío. El silicio puede liberarse de la lámina refractaria después de la liberación del vacío 17. No
50 hay adhesión o hay poca a la lámina 5 refractaria, ya que la lámina refractaria estaba fría tras el contacto con el elemento 13 fundido de silicio. El procedimiento puede usarse para formar láminas delgadas de otros semiconductores además del silicio. La siguiente discusión usa silicio como ejemplo inicial y se generaliza más adelante.

Breve descripción de los dibujos

55 La figura 1 es una representación esquemática de una cámara de sobrepresión y una lámina de molde refractaria para su uso con invenciones de las mismas;

la figura 2 es una representación esquemática de una cámara de sobrepresión de este tipo con una lámina de molde refractaria que tiene una superficie texturizada;

5 las figuras 3A, 3B, 3C y 3D son una representación esquemática de etapas del procedimiento de una invención del mismo que usa una cámara de sobrepresión tal como se muestra en la figura 1, mostrando la figura 3A una lámina refractaria poniéndose en contacto con una superficie de elemento fundido; mostrando la figura 3B una lámina de semiconductor formada sobre la lámina de molde; mostrando la figura 3C la cámara de sobrepresión y el conjunto de lámina de molde retirado del elemento fundido y mostrando la figura 3D la lámina semiconductor formada liberada de la lámina de molde tras la liberación del vacío en la cámara de sobrepresión;

10 las figuras 4A, 4B, 4C y 4D son una representación esquemática de etapas del procedimiento de una realización semicontinua de una invención de la misma que usa una cámara de sobrepresión tal como se muestra en la figura 1, mostrando la figura 4A una lámina refractaria que se aproxima a una superficie de elemento fundido que se extiende por encima, más allá de los bordes de un crisol; mostrando la figura 4B una lámina de semiconductor que se forma sobre la lámina de molde a medida que la lámina de molde se mueve a través de la superficie del elemento fundido; mostrando la figura 4C la cámara de sobrepresión y el conjunto de lámina de molde retirado del elemento fundido después de que haya pasado más allá de la misma; y mostrando la figura 4D la lámina semiconductor formada liberada de la lámina de molde tras la liberación del vacío en la cámara de sobrepresión;

15 las figuras 5A, 5B, 5C y 5D son una representación esquemática de etapas del procedimiento de otra realización semicontinua de una invención del mismo que usa una cámara de sobrepresión tal como se muestra en la figura 1, similar a la que se muestra en las figuras 4A-4D, pero con la cámara de sobrepresión pasar más allá de la superficie de elemento fundido de manera que la superficie de lámina de molde se inclina con respecto a la superficie de elemento fundido, mostrando la figura 5A una lámina refractaria que se aproxima a una superficie de elemento fundido; mostrando la figura 5B una lámina de semiconductor que se forma sobre la lámina de molde; mostrando la figura 5C la cámara de sobrepresión y el conjunto de lámina de molde retirado del elemento fundido; y mostrando la figura 5D la lámina semiconductor formada liberada de la lámina de molde;

la figura 6 es una representación esquemática de una cámara de sobrepresión y una lámina de molde refractaria tal como se muestra en la figura 1, con un respaldo que refuerza la lámina refractaria;

20 las figuras 7A, 7B, y 7C son una representación esquemática de etapas del procedimiento de una invención del mismo que usa una cámara de sobrepresión tal como se muestra en la figura 1 con una lámina de molde que tiene una textura a escala muy grande para proporcionar una lámina semiconductor con una textura a gran escala de este tipo, mostrando la figura 7A una lámina refractaria texturizada; mostrando la figura 7B la lámina refractaria texturizada con un revestimiento protector de semiconductor adherido a la misma; y mostrando la figura 7C la lámina semiconductor texturizada formada liberada de la lámina de molde.

25 Las figuras 8A-E muestran esquemáticamente, en vista en sección transversal cinco fases de un procedimiento y un aparato que retira una superficie de formación de molde del contacto casi en cara con cara con una superficie de un elemento fundido de material fundido, y gira la superficie de molde provocando que material fundido se acumule en bordes de la superficie de formación;

30 las figuras 9A-C, muestran, esquemáticamente en vista en sección transversal, tres fases de un procedimiento y un aparato que introduce una superficie de formación de molde a una superficie de un elemento fundido de material fundido, inclinando hacia abajo la superficie de formación hacia la superficie de elemento fundido, para establecer, progresivamente, casi en contacto cara con cara;

35 las figuras 10A-E, esquemáticamente en vista en sección transversal, cinco fases de un procedimiento y un aparato que retira una superficie de formación de molde del contacto casi cara a cara con una superficie de un elemento fundido de material fundido, inclinando la superficie de formación en sentido contrario a la superficie de elemento fundido mientras que material fundido se acumula en un borde de la superficie de formación;

la figura 11 muestra, esquemáticamente, un crisol con un reborde de grafito parcialmente sumergido;

la figura 12 muestra, esquemáticamente, un crisol con tabiques deflectores sumergidos para la supresión de movimiento ondulatorio;

40 las figuras 13A y 13B muestran, esquemáticamente en vista en sección transversal, dos fases de un procedimiento y un aparato, mostrando la desunión de un menisco de material fundido de un cuerpo semiconductor formado con un elemento de control de menisco que está por encima de la superficie libre del elemento fundido y que no está humedecido por el material fundido;

45 las figuras 14A y 14B muestran, esquemáticamente en vista en sección transversal, dos fases de un procedimiento y un aparato, mostrando la desunión de un menisco de material fundido de un cuerpo semiconductor formado con un elemento de control de menisco parcialmente sumergido que no está humedecido por el material fundido;

- la figura 15 muestra, esquemáticamente, una vista en sección transversal de un crisol con una ranura elevada a través de la que puede bombearse material fundido, ubicado dentro de un crisol, para exponer a una superficie de formación de molde una superficie líquida que sobresale localmente;
- 5 la figura 16 muestra, esquemáticamente, una vista en sección transversal de un crisol con un rebosadero móvil elevado sobre el que el material fundido puede fluir, para exponer a una superficie de molde móvil una superficie líquida que sobresale localmente;
- las figuras 17A y 17B muestran, esquemáticamente, dos fases de un procedimiento y un aparato para proporcionar un saliente elevado en un elemento fundido, que usa principios de magnetohidromecánica.
- 10 La figura 18 muestra, esquemáticamente, un cristal de germinación para el crecimiento de cristales con tamaño de grano relativamente grande;
- la figura 19 muestra, esquemáticamente, una cámara de sobrepresión de vacío relativamente más débil, relativamente más grande, con una cámara de sobrepresión de vacío relativamente más fuerte, relativamente más pequeña, móvil, ubicada en la misma;
- 15 la figura 20 muestra, esquemáticamente, una vista en sección transversal de una lámina de molde que tiene una superficie de molde, con orificios ciegos que se orientan hacia la cámara de sobrepresión, para un control del perfil de vacío localizado;
- la figura 21 muestra, esquemáticamente, una vista en sección transversal de una lámina de molde que tiene una superficie de formación, con regiones de diferente conductividad térmica, para un control del perfil de vacío localizado;
- 20 las figuras 22A y 22B muestran, esquemáticamente, en vista en sección transversal, dos fases de un procedimiento y un aparato que proporciona un molde adyacente a un elemento fundido de material fundido, molde que entonces se mueve, verticalmente más allá de una superficie de elemento fundido de manera que un cuerpo solidifica contra el molde;
- 25 las figuras 23A y 23B muestran, esquemáticamente en vista en sección transversal, dos fases de un procedimiento y un aparato que introduce un molde verticalmente en el interior de un elemento fundido de material fundido;
- la figura 24 muestra, esquemáticamente, en vista en sección transversal, un procedimiento y un aparato que proporciona un molde con una cantidad de material fundido por encima del mismo, y una extracción de vacío del lado opuesto de la lámina de molde, generalmente por debajo de la misma;
- 30 la figura 25 muestra, esquemáticamente, en vista en sección transversal un mecanismo de pasadores eyectores para la desunión de un cuerpo solidificado formado de una superficie de molde;
- la figura 26 muestra, esquemáticamente, en vista en sección transversal un mecanismo de una placa desmoldadora para la desunión de un cuerpo solidificado formado de una superficie de molde;
- 35 la figura 27 muestra, esquemáticamente, en vista en sección transversal, un conjunto de cámara de sobrepresión dual, para su uso ayudando a asegurar una lámina de molde a un conjunto de molde, y a liberar también una oblea formada de una lámina de molde;
- la figura 28 muestra, esquemáticamente, en vista en sección transversal una superficie de molde que se extiende más allá de una región de aplicación de vacío relativa, para dar como resultado un cuerpo solidificado que es más pequeño en extensión de área que una superficie de molde;
- 40 la figura 29 muestra, esquemáticamente, en vista en sección transversal una superficie de molde que tiene bordes curvados, para dar como resultado un cuerpo solidificado que se desprende más fácilmente de una superficie de molde;
- la figura 30 muestra, esquemáticamente, un molde poroso compuesto por diversas capas de diferentes materiales y diferente grosor;
- 45 la figura 31A muestra, esquemáticamente, una vista en sección transversal de una lámina de molde porosa con textura superficial;
- la figura 31B muestra la lámina de molde porosa de la figura 31A, aplicándose un vacío relativamente débil, que genera una cantidad relativamente pequeña de área de contacto entre la superficie de molde y el material de moldeo fundido;
- 50 la figura 31C muestra la lámina de molde porosa de la figura 31A, aplicándose un vacío relativamente fuerte, que genera una cantidad relativamente más grande de área de contacto entre la superficie de molde y el material de

moldeo fundido;

las figuras 32A, 32B, 32C, 32D y 32E muestran, esquemáticamente, etapas de un procedimiento para proporcionar y usar un material funcional sobre la superficie del material fundido;

5 las figuras 33A, 33B, 33C, 33D, 33E, 33F, 33G y 33H muestran, esquemáticamente, etapas de un procedimiento para el crecimiento de una oblea de sacrificio, hacer crecer un material funcional sobre la oblea de sacrificio, fundir la oblea de sacrificio, dejar el material funcional de la oblea sobre la superficie de elemento fundido, poner en contacto una superficie de formación de molde con el elemento fundido en el material funcional y solidificar una oblea formada en la superficie de formación y retirar la oblea formada de la superficie de molde;

10 la figura 34 muestra, esquemáticamente, una vista en sección transversal de un sustrato, normalmente silicio, con orificios pasantes cónicos;

la figura 35 muestra, esquemáticamente, una vista en sección transversal de un sustrato, normalmente silicio, para su uso como lámina de molde que tiene una superficie de molde, con corte por láser, orificios llenos de polvo;

15 la figura 36 muestra, esquemáticamente, una vista en sección transversal de un sustrato, normalmente silicio, para su uso como lámina de molde que tiene una superficie de molde, con una parte interna de silicio poroso, oxidada parcialmente, y una(s) capa(s) externa(s) de SiO₂ porosa(s);

la figura 37 muestra, esquemáticamente en forma de diagrama de flujo, etapas de un procedimiento de una invención del mismo para fabricar un sustrato de silicio microporoso que usa una aplicación no electrolítica de una capa de germen de metal y aumento de láser; y

20 la figura 38 muestra, esquemáticamente, una vista en sección transversal de un sustrato, normalmente silicio, para su uso como lámina de molde que tiene una superficie de molde, con una parte interna de silicio poroso en volumen, perforada por clavijas de silicio poroso oxidadas y una(s) capa(s) externa(s) de SiO₂ en volumen.

Descripción detallada

25 Aspectos generales de las invenciones desveladas en el presente documento se comentan en primer lugar. A continuación de los aspectos generales, se comentan variaciones detalladas.

Un aspecto de una invención del mismo se comentará en primer lugar en una implementación por lotes, en la que una única lámina semiconductor se fabrica a la vez, tal como se muestra esquemáticamente con referencia a las figuras 3A-3B. En este caso, el elemento 13 fundido semiconductor puede estar contenido en un crisol 11 bastante convencional fabricado de grafito, sílice, carburo de silicio, nitruro de silicio y otros materiales conocidos para 30 contener silicio fundido. Tal como se muestra en la figura 1 en detalle, se crea una cámara 1 de sobrepresión de vacío, por ejemplo, mecanizando una cavidad 3 en un bloque de grafito. Una lámina 5 delgada de grafito se fija a la parte inferior de la cámara 1 de sobrepresión. Esta lámina preferentemente tiene a grado considerable de permeabilidad de gas (que tiene una alta porosidad y/o que es relativamente delgada). La cámara de sobrepresión es preferentemente el grafito menos poroso disponible. La cámara de sobrepresión podría también fabricarse de 35 material cerámico no poroso. La lámina delgada se denominará en el presente documento como lámina de molde. Se aplica succión de vacío al conducto 7. El conjunto 8 de cámara 1 de sobrepresión y lámina 5 de molde se soporta desde arriba mediante un elemento estructural (no mostrado). Una extensión del conducto 7 de vacío puede actuar como este elemento estructural, o puede proporcionarse un elemento estructural independiente. Haciendo referencia ahora a la figura 3A, el conjunto 8 se pone en contacto con la superficie 15 de elemento 13 fundido como en la figura 40 3A. Se permite que el conjunto permanezca en contacto con el elemento fundido durante un periodo designado de tiempo, quizás del orden de 1 segundo. La cantidad de tiempo de contacto entre el conjunto y el elemento fundido variará dependiendo de factores que incluyen, pero no se limitan a: la temperatura del elemento fundido, la temperatura de la lámina de molde, el grosor de la lámina de molde y el grosor previsto de la lámina de silicio que va a fabricarse. Una lámina de silicio se congela sobre la lámina de molde, tal como se muestra en la figura 3B debido a 45 que la lámina 5 de molde está más fría que el punto de congelación del silicio. El procedimiento es por tanto una transferencia de calor transitoria dando como resultado que el elemento 13 fundido de silicio se enfría hasta el punto de fusión y entonces extrayéndose el calor de la fusión, que resulta de la acumulación 19 de silicio sólido sobre la lámina de molde. En general, la lámina de molde debe mantenerse más fría que el punto de congelación del material fundido. Incluso más generalmente, al menos una parte de la lámina de molde debe estar a una temperatura por 50 debajo del punto de congelación, durante al menos una parte del tiempo que la lámina de molde se pone en contacto con el material fundido. Tomando silicio como ejemplo, El punto de congelación/fusión es 1412 °C. Intervalos útiles para mantener la lámina de molde podrían ser desde temperatura ambiente hasta 1300 °C, oscilando probablemente desde 900 °C-1200 °C, pero cualquier temperatura por debajo del punto de congelación/fusión puede ser adecuada, dependiendo de la totalidad de las circunstancias.

55 Un fin principal del vacío es provocar que la lámina 19 de silicio se soporte temporalmente contra la lámina 5 de molde. Es útil que la lámina 19 de silicio se retira fácilmente de la lámina 5 de molde después de que se forma la lámina de silicio. Esto es muy útil si la lámina de silicio simplemente se va a desprender. Sin embargo, es muy

importante que a medida que la lámina de silicio se está formando, se adhiera a la lámina 5 de molde. El vacío 17 cumple este objetivo. Sin el vacío, cuando la lámina de molde se retira después de estar en contacto con el silicio 13 fundido durante la longitud apropiada de tiempo, el silicio 19 solidificado permanecerá probablemente detrás sobre la parte 15 superior del elemento fundido y entonces se volverá a fundir. De hecho, se necesita adhesión importante para retirar la lámina 19 de silicio solidificado a partir del elemento 13, 15 fundido debido a que la tensión superficial del silicio fundido está soportando la lámina 19 de silicio hacia abajo.

Después del periodo designado de tiempo, el conjunto 8 se levanta del elemento 13 fundido, portando ahora la lámina 19 de silicio unida al mismo, tal como se muestra en la figura 3C. Finalmente, en la figura 3D, el vacío 17 se libera y la lámina 19 de silicio formada puede separarse de la lámina 5 de molde. Tras la liberación del vacío 17, la lámina 19 de silicio puede desprenderse simplemente. Sin embargo, alguna pequeña cantidad de adhesión residual puede mantener la lámina sin desprenderse. Un enfoque es aplicar presión de gas positiva a la cámara de sobrepresión del conjunto 8, para soplar la lámina 19. Otro es proporcionar algún elemento de retirada mecánica suave. Técnicas para esto se comentan en detalle a continuación.

La lámina 5 de molde de grafito debe tener suficiente porosidad para permitir la suficiente succión para cumplir el objetivo de adherirse a la lámina 19 de silicio. Hay una variedad muy grande de grados de grafito, que oscilan sobre un intervalo muy grande de porosidad. Por tanto, hay muchas elecciones adecuadas. Dos elecciones adecuadas de este tipo son de Grado UT6 y de Grado 2191, ambos de *Ultra Carbono Corporación* de Bay City, Michigan, una división de *Carbone of America*. Grafitos de menor porosidad también pueden usarse fabricando una lámina 26 de molde delgada para permitir flujo suficiente de gas a través de la misma. Tal como se muestra esquemáticamente con referencia a la figura 6, si la lámina 26 de molde es demasiado delgada para soportarse por sí misma sobre su anchura completa mientras está a vacío, una estructura 29 de respaldo puede proporcionarse dentro de la cámara de sobrepresión. Esta estructura puede mecanizarse en el interior de la cámara de sobrepresión en la forma de rebordes y postes. Como alternativa, una pieza de grafito muy poroso u otro material poroso puede colocarse en la cámara de sobrepresión para proporcionar soporte de respaldo. Por ejemplo, puede conseguirse porosidad extremadamente alta usando cuerpos de filtros cerámicos, que se conocen en la técnica.

La porosidad de la lámina 5 de molde no debe ser tan grande que permita que el silicio 13 fundido entre en los poros, de ese modo realizando la liberación de la lámina 19 de silicio difícil o imposible. Dos factores independientes se combinan para evitar que el silicio entre en el interior de poros finos. En primer lugar, la tensión superficial del silicio fundido es demasiado alta para permitir que el mismo se infiltre en poros finos (de un material no humectante). En segundo lugar, el silicio se comienza a congelar rápidamente en contacto con la lámina de molde y esta congelación puede ser especialmente rápida en la situación de relación alta del área superficial con respecto al volumen presentada por un poro fino. El segundo factor está presente incluso para un material humectante.

Una ventaja de grafito menor porosidad para la lámina de molde es que el tamaño de grano de este material es más pequeño y el material puede permitir, por tanto, acabados finos sobre la lámina de silicio formada. Estos acabados pueden ser prácticamente de forma de espejo y proporcionar una lámina de silicio muy lisa. Como alternativa, tal como se muestra en la figura 2, Una lámina 35 de grafito puede tener textura 9 mecanizada deliberadamente para dar la lámina 5 de molde, con la intención de transferir la textura a la lámina de silicio formada. Esta textura puede actuar entonces para capturar luz y para proporcionar también las hendiduras necesarias para cumplir las operaciones de fabricación de la célula, tal como se describen en las solicitudes de patente de SAC mencionadas anteriormente, tales como canales para metalización, tal como dedos conductores, y barras colectoras. La aplicación de vacío extrae el elemento fundido de silicio para rellenar elementos de textura relevantes, tales como hendiduras, canales, etc. La succión de vacío necesita superar la tensión superficial del silicio fundido para rellenar una textura elemento. El elemento de textura puede modelarse como un hemisferio. Por lo tanto, el elemento de textura con forma de hemisferio más pequeño que puede rellenarse puede estimarse aplicando la ecuación de Laplace, tal como sigue:

$$\text{Presión} = 1 \text{ atm} = 2 \gamma / r$$

En la que γ es la tensión superficial del silicio fundido y r es el radio de la textura en forma de hemisferio. Para silicio con $\gamma = 72 \text{ N/m}$, $r = 7 \text{ micrómetros}$. Esto es suficientemente pequeño para permitir una buena captura de luz, especialmente ya que la textura puede ser más grande que con una textura atacada químicamente (ya que no hay silicio que necesite atacarse químicamente/desbastarse). Los tamaños característicos de las hendiduras de metalización son más grandes que los de los elementos de captura de luz, y por tanto, las hendiduras de metalización son más fáciles de rellenar con material fundido. De hecho, la textura de captura de luz puede hacerse a una escala muy grande. La topografía de la superficie superior puede tener una escala de elemento que puede ser más profunda que el grosor de la oblea en sí mismo. La discusión anterior se refiere a usar una superficie de elemento fundido a aproximadamente presión atmosférica. A continuación, se comentan variaciones que usan una superficie de elemento fundido a mayor presión que la presión atmosférica, que permitirá lograr elementos de textura en forma de hemisferio más pequeños que los comentados anteriormente.

Las figuras 7A, 7B y 7C muestran una lámina de molde 31 con textura a gran escala. La escala de esta textura es más grande que el grosor previsto de la lámina de silicio que va a formarse. La figura 7B muestra el conjunto de cámara de sobrepresión y lámina de molde con la lámina 32 semiconductor congelada en su sitio. La figura 7C

muestra la lámina 32 de silicio semiconductor después de liberación de la lámina de molde. Como se muestra, la amplitud de las corrugaciones de la lámina 32 formada es al menos tres veces el grosor de la lámina 32 por sí mismo.

5 Un tema importante es que cuando la capa congelada se levanta del elemento fundido, algunos líquidos pueden adherirse a la parte inferior y entonces congelarse de manera que hace que la parte inferior sea grumoso. Un procedimiento para minimizar esto es levantar la lámina de molde primero por un borde, o una esquina, permitiendo de ese modo que el material fundido se derrame por la parte inferior de la oblea y vuelva al interior del volumen del elemento fundido.

10 la desunión rápido de la lámina semiconductor de congelación del volumen del líquido puede facilitarse levantando la lámina de molde unos pocos milímetros (hasta aproximadamente 10 mm son posibles sin desunión de menisco) inmediatamente después de que contacte con el elemento fundido. Esto establecerá un menisco de líquido, que se depositará más fácilmente cuando la lámina de molde se eleva en el extremo de solidificación. Las etapas de inclinar la lámina semiconductor formada para minimizar la unión de líquido en exceso se comentan en más detalle a continuación.

15 Otro enfoque para retirar cualquier líquido residual del lado inferior de la lámina semiconductor formada tras la extracción es girar rápidamente la lámina de molde y lámina semiconductor unida sacando de ese modo el material fundido residual del lado. Esto puede practicarse con una lámina de molde de forma cuadrada. Sin embargo, por simetría, puede usarse una lámina de molde redonda, que da como resultado la colada de una oblea de lámina semiconductor en forma de disco. Esta oblea entonces podría rebajarse con láser a la forma y tamaño deseados y las piezas cortadas refundidas. El giro de la lámina de molde y la oblea podría comenzar inmediatamente tras la desunión del menisco, que se efectúa elevando la lámina de molde. Como alternativa, el comienzo de la rotación podría ser el medio por el que se efectúa la desunión de menisco. El líquido eyectado lateralmente girando puede permitirse que impacte en el interior de las paredes laterales del crisol de contención y gotee en el elemento fundido. Como alternativa, si solo una pequeña cantidad de líquido se eyecta puede ser deseable permitir que este líquido se arroje por encima de los bordes del crisol para retirar la misma del elemento fundido. Estas gotas de líquido impactarán en una superficie fría y se congelan para su posterior retirada durante el mantenimiento planificado. Esta parte de líquido tendrá impurezas concentradas en el mismo debido a la segregación de impurezas durante la solidificación. Por tanto, la retirada de este líquido retirará impurezas del sistema. Las etapas de giro de la lámina semiconductor formada se comentan en más detalle, y se ilustran a continuación.

30 Puede ser deseable elevar la temperatura de la lámina de molde hasta tan alta como, por ejemplo, 1200 °C, o tan alta como pueda ser, aunque aun evitando cualquier adhesión entre el silicio y la lámina de molde. Una lámina de molde de temperatura más alta dará como resultado una transferencia térmica más lenta y un tamaño de grano más grande en la lámina semiconductor solidificada. Además, En el modo por lotes de oblea única ahora bajo discusión, puede ser deseable para la solidificación que tome tanto tiempo como 5 segundos para proporcionar control más fácil sobre el procedimiento. Además, puede ser deseable controlar un perfil de temperatura a través de la lámina de molde para provocar que la solidificación avance desde un punto o lado sobre la lámina de molde hasta otro, que da como resultado granos más grandes. Por ejemplo, con una lámina de molde circular puede desearse de otro modo tener el centro más caliente que el perímetro o el perímetro más caliente que el centro, dependiendo del sentido deseado de crecimiento de grano. Tener la nucleación inicial en el perímetro puede ser ventajoso debido a que estos pequeños granos se cortarían entonces durante la operación de rebaje.

40 Un medio de efectuar el control de temperatura sobre la lámina de molde es sostener la misma en posición 1-2 cm por encima del elemento fundido de modo que puede obtener calor y entonces soplar argón hacia fuera a través de la lámina de molde (por medio del conducto que se usará más adelante para aplicar vacío) para proporcionar enfriamiento y controlar la temperatura de la lámina. Si el grosor de la lámina de molde varía a lo largo de su extensión, el flujo a través de la misma variará. Cuando la lámina de molde es más gruesa, habrá menos flujo de gas de enfriamiento y la lámina de molde estará más caliente. Otra ventaja de soplar argón hacia fuera de la lámina de molde mientras que la misma está en posición por encima de la superficie del elemento fundido es que se mantendrá vapor tal como óxidos de silicio, a partir de la deposición sobre la lámina de molde.

50 La lámina formada semiconductor congelada puede liberarse de la lámina de molde simplemente mediante la retirada de vacío. Además, cierto flujo hacia el exterior de gas puede impartirse para ayudar a separar la lámina semiconductor formada. Además, la aplicación de presión dentro de la cámara de sobrepresión de manera que provoca que el flujo hacia el exterior de gas también pueden usarse para provocar que la lámina de molde se incline hacia fuera ligeramente y de manera controlable, ayudando de ese modo a separar la lámina de silicio formada semiconductor. Estos procedimientos y adicionales para potenciar la desunión se comentan en más detalle a continuación.

55 En otra realización preferida, la lámina de molde se mueve de manera continua lateralmente sobre la superficie de un baño de elemento fundido. Aunque es posible que la lámina de molde sea una cinta y que el procedimiento sea continuo, también es posible que se ponga en práctica con láminas de molde de longitud concreta, por ejemplo del orden de 0,5 - 2 metros de longitud. Este modo se denominará en el presente documento como modo semicontinuo.

Un requisito que diferencia un modo de operación continuo y uno semicontinuo es que un elemento fundido contenido dentro de y por debajo de las paredes de un crisol, sin nada más, no será suficiente para un modo semicontinuo o continuo, debido a que la lámina de molde más grande que el crisol no puede ponerse en contacto con el elemento fundido sin interferir con las paredes del crisol. Una solución es crear un saliente en el elemento fundido, tal como soldando por onda. Esto puede hacerse bombeando el elemento fundido hacia arriba a través de una ranura y dejando que el elemento fundido desborde por la ranura y se derrame hacia abajo en el interior del baño principal de elemento fundido. Puede bombearse silicio fundido con una bomba centrífuga, inmersa en el elemento fundido. Como alternativa, un campo magnético oscilante, tal como el creado a partir de una bobina colocada por debajo del elemento fundido, puede provocar que el elemento fundido se acumule debido a repulsión electromagnética. La magnetohidrodinámica puede usarse para crear un saliente en la superficie de elemento fundido, pasando una corriente lateralmente en el elemento fundido e impartiendo un campo magnético perpendicular, para provocar una fuerza de cuerpo hacia arriba sobre el elemento fundido. Cada uno de estos procedimientos se comenta en más detalle a continuación, y se ilustra con referencia a figuras de los dibujos.

Otro procedimiento para permitir que la lámina de molde se ponga en contacto con la superficie del elemento fundido en o bien un modo semicontinuo o bien continuo se muestra en las figuras 4A, 4B, 4C y 4D. El elemento 23 fundido se proporciona en una artesa 21 estrecha y la parte superior del elemento fundido se extiende por encima de la parte superior de la artesa. El grado de extensión puede ser pequeño, aproximadamente, de 1 a aproximadamente 4 mm. el elemento fundido permanecerá en su sitio debido a la acción de capilaridad y no desbordará la artesa. La figura 4A muestra la lámina de molde en el conjunto 8 antes de llegar al elemento 23 fundido. La figura 4B muestra la lámina 5 de molde aproximadamente en el punto medio a través de su recorrido sobre el elemento fundido con un grosor de silicio 19 congelado para la parte de la lámina 5 de molde, que ha surgido del contacto con el elemento fundido. La parte central de la lámina de molde está aún en contacto con el elemento fundido y, en este momento, el silicio está en el procedimiento de congelación para la lámina de molde. La consecuencia es que la interfase 21, que delimita la frontera entre líquido y sólido, se inclina en un ángulo α en relación con la superficie inferior de la lámina 5 de molde (indicado por la extensión de la línea superior que limita con el ángulo α). La figura 4C muestra la lámina 5 de molde y el conjunto 8 de vacío después de que haya completado su recorrido, con la lámina 19 de silicio aún unida por el vacío 17. En la figura 4D el vacío 17 se ha liberado y la lámina 19 de silicio se ha retirado.

La velocidad de recorrido de la lámina de molde sobre el elemento fundido puede ser bastante rápida. El tiempo de contacto con el elemento fundido puede variar entre 0,001 y 1 segundo o más, por ejemplo dos segundos.

Si la anchura de contacto es 2 cm, las velocidades de recorrido correspondientes serán de 20 m/s y 2 cm/s, con velocidades en el intervalo de entre aproximadamente 5 - 20 cm/s más probablemente.

El calor de fusión para silicio es 1787 J/g, en comparación con un calor específico de 0,7 J/gK. La energía requerida para solidificar un elemento fundido sobrecalentado está dominada en gran medida por el calor de fusión, ya que incluso con un sobrecalentamiento de 100 °K, el sensible calor representa solo el 4 % de la energía requerida para la congelación. Ya que el procedimiento y grosor de película resultante se controlan por transferencia de calor, el procedimiento es muy tolerante a variaciones en la temperatura del elemento fundido. Para solidificar una película delgada de 200 micrómetros, La energía requerida por unidad de área (basándose solo en el calor de fusión) es 90 J/cm². Para una sustrato de alta conductividad térmica, la extracción de calor está dominada por el coeficiente de transferencia térmica entre la lámina de molde y el semiconductor (por ejemplo silicio).

A modo de ejemplo, coeficientes de transferencia térmica típicos para procedimientos de solidificación rápida son de 1×10^3 a 1×10^6 W/m²K, con un valor experimental para el silicio sobre una rueda de cobre enfriado en agua y acero inoxidable que se determina mediante Uno como $4,7 \times 10^3$ W/m²K. El flujo térmico por unidad de área se define como: $Q/A = h(T_{\text{elemento fundido}} - T_{\text{sustrato}})$.

Para un gradiente de temperatura de 1000 K, el flujo térmico de 470 W/cm² dará como resultado un tiempo de solidificación de ~200 ms par un grosor de 200 μ m. Como comprobación para confirmar la conductividad térmica del sustrato no limita el flujo térmico, la difusividad térmica de grafito es de aproximadamente 0,1 cm²/s, que da como resultado una longitud de difusión térmica de 1,4 mm en 0,2 s. Asumiendo que la energía de solidificación se prolonga por una capa superficial de grafito de 1 mm de grosor con un calor específico de 2 J/gK, dará como resultado una elevación de temperatura de 200 K en el grafito durante el suceso de moldeo.

En muchas realizaciones, será importante mantener la cantidad de elemento fundido disponible en la artesa aproximadamente constante durante el recorrido de la lámina de molde, requiriendo por tanto que el elemento fundido se admita en la artesa. Este elemento fundido puede provenir de un gran depósito de silicio fundido que está contenido en un crisol conectado a la artesa. Cuanto más grande es el depósito, Más pequeño es el cambio en la altura del elemento fundido en la artesa durante un recorrido. Puede lograrse control adicional de la altura de elemento fundido usando un pistón desplazador, por ejemplo de grafito, para compensar el silicio extraído durante un recorrido, moviéndose el pistón hacia abajo.

Aunque la transferencia de calor transitoria determinará un grosor de lámina de silicio que se congelará para la lámina de molde durante el periodo de contacto con el baño de elemento fundido, alguna cantidad de silicio líquido puede salirse sobre el lado inferior del silicio solidificado. Para evitar esto, la lámina de molde puede pasar sobre el baño de elemento fundido en un ángulo con respecto a la horizontal tal como se muestra esquemáticamente en las figuras 5A, 5B, 5C y 5D. Esto proporcionará una carga hidrostática pequeña, que drenará cualquier silicio líquido

adherido a la parte inferior del silicio 19 solidificado, de vuelta al interior del baño de elemento fundido. Las figuras 5A, 5B, 5C y 5D muestran los mismos momentos en la secuencia de procedimiento tal como se describieron con respecto a las figuras 4A, 4B, 4C y 4D, respectivamente. Obsérvese que el crisol 25 en las figuras 5A y 5B tiene las paredes externas inclinadas. Esta inclinación proporciona un margen de protección frente a la humectación de silicio hacia abajo de la pared lateral del crisol, especialmente durante la condición de la figura 5B cuando el líquido se está saliendo del borde del crisol.

Otro beneficio importante de estos procedimientos es la habilidad de expulsar impurezas en el interior del elemento fundido y evitar que las tengan incorporadas en la lámina de silicio de crecimiento. La mayoría de impurezas eléctricamente perjudiciales son mucho menos solubles en el sólido que en el líquido y por tanto tienden a expulsarse en la interfase de solidificación. En los procedimientos de crecimiento de cristales en los que la interfase líquido/sólido se mueve en una dirección controlada, tal como es el caso en estos procedimientos, esto ofrece la oportunidad de purificar el material de materia prima. Para ser capaz de segregar impurezas de vuelta al volumen del elemento fundido, la tasa de avance de la interfase líquido/sólido no debe ser demasiado alta, o se congelarán impurezas en el material solidificado. Aunque la tasa de formación de lámina es alta en las invenciones desveladas en el presente documento, la tasa de avance de la interfase de solidificación interface es significativamente más baja, como consecuencia del ángulo α de inclinación de la interfase líquido sólido con respecto a la dirección de arrastre, Indicada por la flecha P, que es también paralela a la superficie inferior de la lámina de molde. Por ejemplo, considerando cuando la anchura de la artesa que contiene silicio fundido es de 2 cm y cuando la longitud de tiempo necesario para el contacto es de 0,2 segundos. La velocidad de arrastre es entonces de 10 cm/s. Si la lámina que se fabrica es de 200 micrómetros de grosor (un grosor típico), Entonces la tasa de avance de la interfase de solidificación es de 200 micrómetros en 0,2 segundos, o de 1 mm/s. La tasa de avance, aunque es alta, permitirá aún la segregación y la consiguiente purificación.

La segregación también impacta sobre algunos dopantes y en procedimientos crecimiento de cristales estándar, lo que hace difícil usar tales dopantes. Por ejemplo, el galio es un dopante tipo p deseable en silicio, pero normalmente es difícil de usar debido a que la segregación da como resultado que la resistividad del cristal crecido disminuya a medida que el crecimiento continua en un procedimiento de crecimiento en lingote o de colada. Lo mismo es cierto para el fósforo, un dopante tipo n. Sin embargo, con procedimientos de las invenciones actuales, puede acumularse dopante en el elemento fundido y alcanzar un estado estacionario, que puede mantenerse mediante reabastecimiento apropiado del elemento fundido. De este modo, cada oblea se forma a partir de un elemento fundido con el mismo nivel de dopaje y por tanto tendrá por sí mismo el mismo nivel de dopaje. También, la formación de obleas directamente a partir del elemento fundido permite, la monitorización del procedimiento rápida y precisa de la resistividad del volumen. Cualquier cambio necesario en la concentración de dopante en el elemento fundido puede efectuarse rápidamente, junto con cada adición de materia prima de Si.

El ángulo de inclinación de la interfase de crecimiento de cristal se debe al hecho de que la mayoría del calor se retira del silicio a través del grosor de la lámina de solidificación (perpendicular a la dirección de recorrido/arrastre). Como consecuencia, los gradientes de temperatura en la lámina de solidificación pueden ser muy bajos. Esto llevará a bajas tensiones dentro de la lámina de solidificación y por tanto baja densidad de dislocaciones. Debido a que la densidad de dislocaciones es un factor importante que degrada el rendimiento electrónico de la lámina de silicio para tecnología fotovoltaica, esto es una ventaja importante.

La lámina 5 de molde puede fabricarse de grafito, pero también de una gama de otros materiales que incluyen, por ejemplo, carburo de silicio, nitruro de silicio, sílice, carburo de boro, nitruro de boro pirolítico y aleaciones de estos que incluyen oxinitruro de silicio. Debido a que la lámina de molde se mantiene fría, también es posible considerar materiales tales como óxido de aluminio (que de otro modo llevaría a la contaminación del elemento fundido por aluminio si se pone en contacto con el elemento fundido mientras está caliente). Otros materiales, tal como el silicio por sí mismo, se comentan a continuación. En todos los casos, la porosidad requerida para permitir la succión de vacío puede crearse fabricando la lámina de molde a partir de polvo y o bien sinterizando o bien de cualquier otro modo uniendo el polvo entre sí en un cuerpo poroso. También es posible fabricar la lámina de molde de un material no poroso y proporcionar una densidad suficiente y una pluralidad de pequeños orificios para admitir el vacío. En general, la lámina de molde debe mostrar suficiente permeabilidad para permitir la succión, pero no suficiente para admitir silicio. No debe contener metales de transición o impurezas de metales de transición. Debe fabricarse en una lámina delgada y o bien plana o bien con textura. Debe tolerar ciertos grados de tensión/choque térmico.

Lo anterior ha descrito, en general, que la cara de formación de la lámina de molde (también denominada molde de formación, en algunos casos) está a una temperatura que está por debajo del punto de fusión del material semiconductor. Esto debe ser así para una parte del área de la cara de formación, durante una parte de la duración de tiempo que la cara de formación está en contacto con el material fundido, pero no necesariamente para el tiempo completo ni sobre el área completa de la cara de formación. De forma similar, lo anterior ha descrito que un vacío (o, tal como ya se ha dicho, un diferencial de presión) se aplica de modo que hay un diferencial de presión entre la cara de no formación trasera del molde de formación, y el material fundido, de modo que el material fundido se extrae o fuerza contra el molde de formación. Sin embargo, este diferencial de presión o vacío no necesita aplicarse sobre el área superficial completa del molde de formación, o incluso sobre la parte completa que está en contacto con material fundido, o, Durante la duración completa de tiempo que el molde de formación está en contacto con el material fundido.

Los procedimientos descritos en el presente documento se basan en la presión diferencial aplicada entre la cara de la lámina 5 de molde (la figura 1) expuesta al elemento fundido (la cara de formación, también denominada superficie 6 de formación) y la cara opuesta de la lámina de molde (la a cara 4 trasera). Un medio conveniente de aplicar esta presión diferencial emplea una bomba de vacío para generar baja presión sobre la cara 4 trasera de la lámina de molde, mientras que usa sustancialmente gas de presión ambiente en la superficie 15 de elemento fundido y por tanto la cara 6 de formación de la lámina 5 de molde. Una ventaja de esta realización es que el cerramiento del horno no necesita sellarse herméticamente al gas ni necesita ser capaz de sustentar presiones positivas más allá de lo que se requiere para purgar la contención de gas. Sin embargo, en otra realización, la presión diferencial entre las caras de la lámina de molde se genera venteando la cara 4 trasera de la lámina 5 de molde directamente a la atmósfera, mientras que se mantiene la atmósfera sobre la cara de formación de la lámina de molde a una presión sustancialmente más alta que la presión atmosférica local. Una ventaja de esta realización es que no se requiere una bomba de vacío. Una ventaja adicional de esta realización es que pueden lograrse presiones diferenciales de a través de la lámina de molde que la presión atmosférica local, lo que puede conferir beneficios de procedimiento, por ejemplo en la creación de textura superficial fina. El diferencial de presión puede aplicarse antes de que la lámina de molde se ponga en contacto con la superficie del material fundido, o después.

Aunque la presente descripción y reivindicaciones usan el término vacío, también corresponde a cualquier medio de desarrollo de una diferencia de presión entre la cara 6 de formación y la cara 4 trasera de la lámina 5 de molde, Independientemente de la presión absoluta en o bien la superficie 6 de formación o bien la parte 4 trasera de la lámina 5 de molde. Experimentalmente, presiones diferenciales que oscilan desde 1 kilopascal (kPa) hasta 100 kPa a través del grosor de la lámina 5 de molde han demostrado viabilidad para el procedimiento. Debe observarse también que siempre que la presente descripción y las reivindicaciones usan el término vacío, se entiende que significa un vacío parcial de cualquier grado, hasta e incluyendo un vacío completo.

POROSIDAD

Lo anterior, y a continuación, describe láminas de molde y cuerpos de molde de formación que son porosos. Por poroso, se entiende porosidad de celda abierta, de manera que el gas puede fluir a través del cuerpo poroso desde una superficie hasta una superficie opuesta. Tales cuerpos porosos pueden incluir también regiones porosas de celda cerrada. Es necesario que el cuerpo global sea poroso de tal manera que permita la transmisión de gas a través del mismo. De ese modo, el término poroso se usa en el presente documento para describir tales cuerpos porosos que permiten la transmisión de gas a través del mismo, aunque pueden incluir partes de celda cerrada.

El crecimiento de la oblea semiconductor de formación puede avanzar en un modo continuo, semicontinuo o discreto, tal como se ha expuesto antes. Para el crecimiento continuo de una lámina de molde debe alimentarse sobre un reborde o labio de un crisol que contiene elemento fundido, que se pone en contacto con el elemento fundido sobre una distancia predeterminada, y se alimenta entonces hacia fuera sobre un reborde o labio del crisol. Una lámina de molde plana requerirá que alguna parte del elemento fundido resida por encima del labio del crisol. Esto podría conseguirse mediante la formación de una protuberancia o saliente elevado en el elemento fundido, mediante bombeo mecánico o fuerzas magnetohidrodinámica (MHD), tal como se comentó anteriormente y también a continuación. O, el material fundido podría residir por encima del reborde o labio del crisol si el menisco de líquido se ancla al borde superior del crisol. Este crisol puede estar en la forma de una artesa lineal, tal como se muestra anteriormente con referencia a las figuras 4A-4D y a las figuras 5A-5D. Una artesa de este tipo podría ser independiente, o podría residir en o por encima de otro, crisol más grande. Esta disposición tendrá la ventaja de retener cualquier elemento fundido que se perdía por encima del borde del crisol de artesa. Un medio de transferir el elemento fundido desde el crisol más grande más abajo, de vuelta al interior de la artesa puede ser útil para minimizar el desperdicio.

Un problema con el crecimiento discreto o semicontinuo, tal como se muestra esquemáticamente con referencia a las figuras 8A-8E es la disposición de material fundido que permanece sobre la superficie lateral del elemento fundido de la oblea después de que se forme. Una lámina 805 de molde microporosa suspendida desde un conjunto 808 de cámara de sobrepresión de vacío que se sumerge en el interior del elemento 813 fundido de manera que la cara de formación de la lámina 805 de molde es sustancialmente paralela a la superficie 815 libre de elemento fundido y entonces se extrae en el sentido de la flecha W, tiende a formar una gota 889 colgante (la figura 8D). Esta gota interfiere con el procedimiento de oblea subsiguiente y generalmente es indeseable. Un procedimiento comentado anteriormente para retirar este líquido en exceso, y ahora ilustrado en el presente documento es para girar la lámina 805 de molde rápidamente tal como se indica por la flecha S, tras la extracción del elemento 813 fundido, sacando de ese modo el líquido en exceso fuera del reborde o segregándolo a la periferia 888 de la oblea 819 formada (la figura 8E). Este procedimiento puede usarse con láminas 805 de molde redondas o poligonales. El elemento fundido en exceso puede devolverse al crisol o retirarse del sistema como medio de expulsión de impurezas. El elemento fundido en exceso ubicado en el reborde o las esquinas de un sustrato plano de giro puede rebajarse y devolverse al crisol. Como con el líquido en exceso, algo o todo este material puede aislarse como medio de retirada de impurezas. Este elemento fundido en exceso será probablemente más alto en impurezas expulsadas ya que serán las últimas en congelarse. Tal como se muestra en la figura 8E, el eje de rotación de la lámina 805 de molde es sustancialmente normal con respecto al de la oblea 819 formada. Este no es necesariamente el caso. Además, el eje de rotación se muestra que es vertical, en relación con un campo gravitacional. Este tampoco es necesariamente el caso.

Otro procedimiento para tratar con una gota persistente de material fundido, ilustrado esquemáticamente con referencia a las figuras 9A-9C y las figuras 10A-10E, es provocar que una gota 1088 se forme sobre un borde de la oblea 19 formada, en lugar de en el centro. De esta manera, un área de sacrificio de la oblea puede reservarse para el fin de alojar la gota, que puede cortarse de la oblea formada y alimentarse de vuelta al interior del elemento fundido. Un procedimiento para lograr esto es inclinar la cámara de sobrepresión de vacío completa y la cara de formación unida a un ángulo con respecto a la superficie de elemento fundido. Este enfoque requiere el uso de una conexión de vacío que permite el movimiento de inclinación, y capaz de realizar una operación a temperaturas de silicio líquido, sin liberación de contaminantes que puedan comprometer la calidad de la oblea final.

Una implementación de este procedimiento es en dos fases. La primera fase es el abastecimiento (la figura 9A-la figura 9C), en el que la cara 6 de formación se soporta a una inclinación y se traslada hacia abajo tal como se indica mediante la flecha L, tras el contacto con la superficie 15 de elemento fundido se fabrica en el borde 985 inferior de la cara de formación. La cámara de sobrepresión de vacío completa con la cara de formación unida se hace rotar alrededor de un eje paralelo con el borde 985 de la cara 6 de formación en contacto con la superficie 15 de elemento fundido de tal manera que arrastra el material fundido a través de la cara 6 de formación. El borde 985 de la cara de formación que toca la superficie de elemento fundido puede moverse verticalmente durante este suceso. Una consecuencia de esta introducción de arrastre del material fundido a la cara 6 de formación es potenciar el crecimiento lateral de la oblea de silicio sobre la cara de formación (paralela al plano de la cara de formación) para formar una estructura de grano alargada con granos relativamente grandes, lo que es deseable. La congelación subsiguiente sobre este modelo cristalográfico de grano grande puede producirse normal a la superficie de la cara 6 de formación. Asociada con la introducción de arrastre y el crecimiento lateral hay una interfase de silicio líquido-sólido, que está a un ángulo con respecto al plano de la oblea (tal como se muestra en la figura 4B, pero en este caso en el contexto de una artesa).

Debe observarse que el mismo aparato también puede usarse para introducir la cara de formación paralela a la superficie del elemento fundido de modo que todas las partes de la cara de formación se ponen en contacto con el elemento fundido al mismo tiempo. En tal caso, la interfase entre silicio sólido y líquido será sustancialmente paralela al plano de la lámina de formación y de la oblea. Casos en los que la lámina de formación se lleva hacia abajo paralela al elemento fundido tienen la posibilidad de capturar pequeñas cantidades de gas ambiente del horno entre la lámina de formación y el elemento fundido, sin embargo, estas pequeñas cantidades de aire se retirarán mediante el vacío que se extraerá a través de la cara de formación.

Si, tal como se muestra con referencia a las figuras 10A-10E, la superficie 6 de formación se inclina a medida que la lámina 5 de molde se retira de la superficie 15 de elemento fundido el menisco 1087 de líquido puede verterse de manera controlada, y cualquier elemento 1088 fundido residual dejarse en el borde 1089 de la oblea 19 formada (la figura 10E). Esto tiene la ventaja del arrastre del menisco de manera lineal a través de la superficie de oblea, dejando por detrás solo una película muy delgada de material fundido. Tal como con la disposición de giro, el material en exceso o segregado puede rebajarse y devolverse al elemento fundido; con algo del material rebajado aislado para la retirada de impurezas del elemento fundido y el crisol.

El acabado superficial, que incluye planitud y suavizado, de la oblea de silicio se determina en gran parte por el vertido del menisco de líquido después del crecimiento de la oblea. Un buen acabado superficial puede llevarse a cabo mediante el movimiento de inclinación descrito anteriormente pero otros procedimientos pueden también mejorar adicionalmente el acabado superficial. Un factor importante en la desunión del menisco de líquido es el movimiento del elemento fundido durante el vertido del líquido de la superficie de oblea, por ejemplo inclinando, o girando la oblea formada, tal como se describe a continuación. Una retracción suave, lenta y controlada de la oblea del líquido lleva a una superficie de oblea suave. La inestabilidad del menisco de líquido durante el vertido, como por ejemplo la causada por ondas en el elemento fundido, puede llevar a defectos superficiales adversos, tal como ondulaciones y protuberancias, sobre la superficie de la oblea.

Un procedimiento para mejorar el acabado superficial de la oblea es reducir la amplitud de cualquier movimiento ondulatorio del elemento fundido, y amortiguar rápidamente cualquier onda que se produzca. Un procedimiento para reducir la amplitud de onda es usar un elemento 13 fundido superficial (la figura 3A), por ejemplo una profundidad de elemento fundido de 5 mm o menos es útil, e incluso tan superficial como 3 mm o 1 mm, si las impurezas de partículas locales sobre la parte inferior del crisol no son más grandes que aproximadamente 0.5 mm. La profundidad de elemento fundido mínima que puede lograrse para determinados materiales de crisol 11 no humectantes, tal como cuarzo, se determinan por la tensión superficial de silicio líquido y el ángulo de contacto entre el silicio líquido y el material de crisol. Como resultado, para obtener profundidades de elemento fundido muy superficiales en tales materiales, un reborde de material humectante también puede incluirse para garantizar cobertura de área total del crisol. Por ejemplo, tal como se muestra esquemáticamente con referencia a la figura 11 un anillo 1112 delgado (por ejemplo, grosor de 5 mm) de grafito (que es humectante para silicio) puede usarse, con un diámetro externo que coincide con el diámetro interno del crisol 11, y una altura igual a la profundidad deseada del elemento 13 fundido.

Otro procedimiento para reducir las ondas en el elemento fundido, mostrado esquemáticamente con referencia a la figura 12 es usar tabiques 1214 deflectores físicos sumergidos por debajo de la superficie 15 del elemento 13 fundido. Estos tabiques deflectores impiden el flujo lateral de líquido y amortiguan rápidamente cualquier movimiento

ondulatorio presente en el elemento fundido.

Otros medios de controlar la tasa de retirada de elemento fundido de la superficie de oblea formada puede ser un elemento de control de menisco. Este consiste en un cuerpo independiente que se mueve en relación con la cara de formación y la posición de la que controla la posición de desunión del menisco de la superficie de oblea recién formada.

Este tema comenta la estabilidad de un menisco unido a una cara de formación que es paralela a pero está elevada con respecto a la superficie de elemento fundido libre nominal. El ángulo de humectación de equilibrio de un líquido sobre una superficie sólida se determina mediante las energías superficiales del elemento fundido y la superficie. Este ángulo es reproducible y se considera que es una constante para un sistema dado de líquido, sólido, y gas ambiente. El ángulo de equilibrio de unión de silicio líquido sobre silicio sólido en un gas inerte es de 11 grados. Debido a que una situación física existe en la que el ángulo de humectación se perturba a menos de 11 grados, entonces el punto de unión de menisco tenderá a moverse hasta que se reestablezca el equilibrio y el ángulo de unión sea de 11 grados. El caso de unión del menisco de líquido a la cara de formación horizontal (soportada paralela a la superficie de elemento fundido libre) puede examinarse usando la ecuación de Laplace, que relaciona la diferencia de presión a través de una interfase líquido-gas o líquido-líquido, El radio de curvatura de esa superficie, y la energía superficial de esta interfase. La presión a través de la interfase puede tomarse como la presión hidrostática:

$$P = \rho g H$$

(densidad de líquido*gravedad*altura desde la superficie libre). La presión de gas ambiente se toma como constante en este cálculo, y se considera que es igual a la presión en el líquido en la superficie de elemento fundido libre.

Si un borde lineal de unión se considera entonces que solo hay un radio de curvatura, y la ecuación de Laplace pasa a ser

$$P = 2\gamma/r.$$

Al asumir un ángulo de unión y que aumenta a lo largo de la superficie en etapas muy pequeñas de ángulo de arrastre, la caída de presión asociada y el cambio en la curvatura pueden resolverse numéricamente. Se halló que a través de la iteración que la altura estable máxima de la cara de formación por encima de la superficie de elemento fundido libre fue aproximadamente de 0,01077 m. Se asumieron un valor de densidad de 2530 kg/m³ y una tensión superficial de 0,72 N/m.

En el caso de una cara de formación que se eleva lentamente de la superficie de elemento fundido libre puede predecirse lo siguiente. Siempre que la longitud del ángulo de unión de menisco con la cara de formación sea mayor que 11 grados, el sistema es estable y el líquido 813 permanece unido al borde de la cara de formación. Una vez que la cara de formación se eleva hasta una altura en la que un aumento adicional en altura demandará un ángulo de unión de menos de 11 grados con la superficie plana de la cara de formación, el menisco 887 se mueve lateralmente hasta que se reestablece el equilibrio o hasta que se cumple el recorrido del menisco desde el borde externo de la cara de formación. En este caso, el contacto entre el elemento fundido y la cara de formación se pierde, y una gran gota 889 que permanece se deja sobre la cara de formación (la figura 8D). Perturbaciones muy pequeñas en la altura del elemento fundido pueden variar la velocidad de desunión del menisco, o incluso invertirla temporalmente. Estas perturbaciones pueden provocarse por ondas en el elemento fundido; que son difíciles de evitar en un contenedor de líquido (crisol) sometido a agitación por la acción de la cámara de sobrepresión de vacío y la cara de formación.

El control de la velocidad de desunión de menisco es deseable, Ya que se ha observado que el acabado superficial de la lámina de Si formada por esta técnica es altamente dependiente de la velocidad relativa de extracción del menisco de la superficie de lámina. Técnicas que controlan mejor la velocidad de extracción del menisco de la superficie de lámina de Si recién formada son bien adecuados para controlar el acabado superficial de la lámina de Si.

La discusión anterior de la estabilidad de la unión de menisco pertenece al control de velocidad de desunión del menisco de la lámina de Si. Unos medios de controlar la tasa de retirada de elemento fundido de la superficie de oblea formada puede ser un elemento de control de menisco. Este consiste en un cuerpo independiente que se mueve en relación con la cara de formación y la posición de la que controla la posición de desunión del menisco de la superficie de oblea recién formada.

Una configuración de mecanismo de desunión de menisco usa un material que no está humectado por el elemento fundido. El material debe tener un ángulo de humectación de más de aproximadamente 60 grados con respecto al material fundido en la atmósfera ambiente presente. Las figuras 13A y 13B muestran una posible implementación de un mecanismo de este tipo. En este ejemplo, una oblea 19 se forma sumergiendo la lámina 5 de molde en el elemento fundido 1313. Después del crecimiento de la oblea, la lámina 5 de molde se retrae por encima de la superficie 1315 libre del elemento 1313 fundido, a una altura tal que el menisco 1387 de líquido aún está unido al lado de elemento fundido de la oblea 19 formada (menos de 0,01077 m por el ejemplo anterior). El elemento de

control de menisco, por ejemplo, que consiste en un cilindro 1391 horizontal de pequeño diámetro (por ejemplo, 5 mm), se traslada entre la oblea 19 formada y el elemento 1313 fundido, en el sentido indicado por la flecha M, forzando la desunión del menisco 1387 de líquido de la oblea 19 silicio sólido. Esto se produce debido a la deformación de la superficie de menisco de manera que el ángulo de unión será menos de 11 grados si la posición de unión permanece estacionaria. Después del traslado del elemento 1387 de control a través de la longitud completa de la oblea 19, El superficie 1318 lateral de elemento fundido de la oblea 19 está casi libre de silicio 1387 líquido.

Otra configuración de elemento de control de menisco, mostrada en las figuras 14A y 14B, Es un cuerpo 1491 de un material no humectante, que está parcialmente sumergido por debajo de la superficie 1415 de elemento fundido libre del elemento 1413 fundido. Otros elementos mostrados en las figuras 14A y 14B con referencia numérica que comienza en 14, y son similares a los establecidos en la figura 13, que comienzan en 13 y tienen las mismas referencias numéricas para los últimos dígitos significativos, son entre los mismos, análogos.

El elemento de control de menisco puede combinarse con movimiento vertical o de inclinación de la cámara de sobrepresión y la lámina de molde, o puede implicar tanto movimiento vertical como lateral del cuerpo de desunión de menisco.

ARTESA

La calidad del acabado superficial de la oblea puede afectarse por la velocidad de extracción del menisco de la superficie de oblea recién formada. Un medio de controlar de manera ajustada esta velocidad es deseable. También, Una introducción por fases del material fundido a la superficie de lámina de molde, en un arrastre controlado puede tener beneficios en la cristalografía final de la oblea formada. Específicamente, una introducción lateral de material fundido a la cara de formación de la lámina de molde puede potenciar el crecimiento lateral de toda o parte de la oblea de formación- dando como resultado una estructura de grano alargada, más grande. Por introducción lateral, se entiende que se proporciona movimiento relativo entre la cara de formación y la superficie libre del material fundido, movimiento relativo que tiene una componente que es paralela al plano de la superficie libre o tangencial en el caso de una superficie de elemento fundido libre curva. La congelación subsiguiente de material semiconductor, tal como el Si del elemento fundido a esta modelo cristalográfica de estructura de grano alargada puede producirse para alcanzar el grosor de oblea deseado. Un medio de lograr tanto la introducción controlada de elemento fundido en la superficie de lámina de molde y la separación de elemento fundido de la superficie de oblea es mediante el uso de la artesa mencionada anteriormente, en conexión con las figuras 4A-4D y las figuras 5A-5D y proporcionar un saliente, o parte elevada del elemento fundido. Medios para proporcionar un saliente de este tipo se comentan a continuación. En estos procedimientos, La artesa 21 (rellena con material fundido) se coloca de manera que el elemento fundido hace contacto con un borde de la lámina 5 de molde, después de lo que el movimiento lateral relativo de la artesa 21 a la lámina 5 de molde se efectúa para arrastrar el material 23 fundido a través de la cara de formación de la lámina 5 de molde. Tal movimiento puede combinarse con la basculación de la lámina 5 de molde para potenciar la retirada de elemento fundido de la superficie de oblea, tal como se describió. Un chorro de gas también podría usarse para forzar el elemento fundido en exceso hacia fuera de la superficie de oblea. Una artesa de este tipo requiere un medio de relleno o reabastecimiento, a medida que el elemento fundido se irá perdiendo para que se formen las obleas, así como es posible el derramamiento por encima del borde. En un modo discreto o semicontinuo de crecimiento, la artesa puede rellenarse sumergiendo la misma bajo la superficie de un elemento fundido en un crisol más grande.

ELEMENTO FUNDIDO ELEVADO BOMBEADO

Una técnica comentada generalmente, brevemente, Anteriormente para proporcionar un procedimiento continuo es crear una región relativamente elevada en el elemento fundido, denominada en el presente documento en algunos casos, como saliente, tal como soldando por onda. El aparato para cumplir esto se muestra esquemáticamente con referencia a la figura 15. Esto puede hacerse bombeando el elemento 1513 fundido hacia arriba a través de una ranura 1582 y dejando que el elemento fundido desborde por la ranura y se derrame hacia abajo en el interior del baño principal de elemento 1513 fundido. El silicio fundido puede bombearse con un medio 1585 de presurización de manera continua o discontinua de silicio 1513 fundido para que fluya por encima de la superficie 1515 libre del elemento fundido, proporcionando una ubicación para la unión de silicio fundido a la cara 6 de formación de la lámina 5 de molde, Inmersa en el elemento 1513 fundido. Los medios de bombeo pueden ser una bomba de engranajes, Una bomba de rodete o cualquier otro medio adecuado. En una realización relacionada, bombear el silicio fundido puede llevarse a cabo de una manera no continua usando un desplazador de tipo jeringa que coincide con un receptáculo lleno de silicio en comunicación de fluido con la ranura 1582. Esta realización tiene la ventaja de permitir control en tiempo real directo sobre la altura del menisco 1518 de elemento fundido variando la posición de desplazador. Una realización similar usa gas como desplazador para alimentar la ranura de manera no continua con silicio fundido. Las ventajas de ambas realizaciones sobre las ranuras bombeadas de manera continua son disminución de desgaste, Disminución de complejidad de hardware, y la capacidad de variar la altura de menisco en una base por oblea.

En lugar de basarse en salientes forzados cinéticamente o bombeados, tal como se muestra esquemáticamente con referencia a la figura 16, una superficie 1615 de líquido localmente alta puede presentarse en su lugar a una lámina

5 de molde móvil arrastrando un rebosadero 1681 en el sentido de la flecha W, por debajo del superficie 1615 de silicio líquido a lo largo de la longitud de la lámina de molde, que se mueve por sí misma en el sentido de la flecha M, que tiene una componente que es paralela a la flecha W y que tiene una magnitud que supera la magnitud de la velocidad del rebosadero en el sentido de la flecha W. Un rebosadero de este tipo elevará temporalmente la altura 1685 de superficie libre de silicio líquido por encima del rebosadero 1681 móvil. A medida que el silicio fundido fluye por encima del rebosadero móvil, la lámina de molde se mueve independientemente por encima del pico del rebosadero, también generalmente en la misma dirección en el sentido de la flecha M, que engancha el líquido que fluye. Una vez que el rebosadero ha atravesado el crisol 1611 y la longitud completa de la lámina de molde ha pasado por encima del borde de la superficie de líquido, la oblea 1619 solidificada por completo puede retirarse, el rebosadero puede volver a su posición inicial, y el ciclo puede comenzar de nuevo. La lámina de molde también puede ser estacionaria, con el rebosadero móvil y el elemento fundido elevado relacionado proporcionando contacto con la lámina de molde, que es horizontal, ligeramente por encima de la superficie libre. El rebosadero puede ser simétrico de manera que las obleas pueden formarse en ambos sentidos.

Otro procedimiento para provocar que una sección de la superficie de elemento fundido se eleve o baje verticalmente se muestra esquemáticamente con referencia a las figuras 17A y 17B. Una parte del elemento 1713 fundido se segrega en una artesa 1711 eléctricamente aislante. El cuarzo puede usarse como material de la artesa. La artesa 1713 está por sí misma dentro de y en comunicación de fluido con un depósito de fluido más grande, no mostrado, en el que el elemento 1713 fundido puede fluir. Si se realiza contacto eléctrico con la región eléctricamente segregada en ambos extremos a través de dos contactos 1791a y 1791b, una trayectoria de corriente a lo largo del sentido de la flecha I puede ubicarse para el volumen 1713 líquido definido por la dimensión interior del crisol 1711 y la profundidad de elemento fundido.

Si esta corriente se aplica en un campo magnético transversal a lo largo del sentido indicado por la flecha B, una fuerza de cuerpo F se crea en la región confinada de elemento fundido. El sentido de la fuerza de cuerpo es o bien hacia arriba o bien hacia abajo dependiendo de los signos de la corriente I y el campo magnético B. Si un extremo de la artesa 1711 (mostrado abierto en el lado izquierdo de la figura 17A) se permite que se comunique con el volumen más grande de elemento fundido que reside en el exterior de la artesa (no mostrado), entonces un cambio en la posición vertical de la parte superior del líquido 1715 en la artesa puede verse afectado por la magnitud y signo de la corriente, tal como se muestra comparando el nivel de la parte superior del líquido mostrado en las figuras 17A y 17B; mientras que aún se confina la trayectoria de corriente y la fuerza de cuerpo asociada al elemento fundido en la artesa y entre los dos electrodos.

Los procedimientos y el aparato descritos anteriormente para la introducción lateral de la lámina de molde a la superficie del elemento fundido pretende que potencien el crecimiento de los granos en la oblea de silicio formada, dando lugar a granos largos que muestren propiedades eléctricas mejoradas. Un procedimiento para aumentar adicionalmente el tamaño de grano es mediante la germinación de la oblea formada con un cristal de germinación de orientación conocida, que puede implementarse junto con cualquiera de los procedimientos de introducción lateral descritos anteriormente.

Un procedimiento para la germinación de la oblea de crecimiento se muestra con referencia a la figura 18. La germinación se logra uniendo (o bien mediante vacío o bien mecánicamente) una pieza 1829 de silicio monocristalino en el borde delantero de la lámina 5 de molde, que se moverá en relación con el elemento fundido en el sentido de la flecha A (el primer borde de la lámina de molde en ponerse en contacto con la superficie de elemento fundido). Esto se demuestra esquemáticamente en la figura 18 en una implementación de artesa. Después de que el elemento 15 fundido se introduce en el cristal de germinación, la oblea 1819 se forma mediante el crecimiento lateral de un único grano de la misma orientación que el cristal de germinación. Después de que el moldeo de la oblea se completa, el cristal de germinación puede cortarse y volver a usarse para el próximo evento de moldeo; o puede usarse un nuevo cristal de germinación para cada evento de moldeo.

Puede ser posible influir en la cristalografía final de la lámina de Si formada inicialmente mediante el crecimiento con semillas discretas, que puede tener una orientación cristalográfica conocida. Estas semillas pueden colocarse sobre el lado de elemento fundido de una capa funcional, y pueden soportarse sobre la cara de formación mediante vacío. La combinación de una capa funcional de supresión de nucleación (comentada a continuación) con semillas de cristalografía discreta puede dar como resultado una lámina de Si final con granos grandes de una orientación predeterminada. Estas semillas pueden consistir en una banda de oblea de Si dispuesta en el borde de la cara de formación, de manera que el crecimiento lateral se produce desde esta semilla y se propaga a través de la cara de formación. Una banda de germinación de este tipo puede consistir en un fragmento de oblea de Si de orientación $\langle 111 \rangle$. Otra posibilidad es un conjunto distribuido uniformemente de partículas repartidas por la cara de formación. En este caso, la lámina Si resultante puede consistir en una matriz de granos de tamaño uniforme que corresponde a la separación de las semillas iniciales.

La propagación lateral del frente de solidificación a lo largo de la longitud de una oblea de formación puede ser ventajosa al hacer crecer granos grandes y simplificar el diseño de fabricación de hardware. Mientras que los procedimientos y el aparato descritos anteriormente permiten propagación lateral de y control directo sobre la interfase sólido-fundido, también puede ser ventajosos procedimientos y aparato que proporcionan crecimiento lateral (en el plano) que es libre de los efectos de líquido superficial en la interfase sólido-fundido. En todas las

realizaciones de las presentes invenciones, la oblea crecimiento requiere contacto térmico entre el elemento fundido y la lámina de molde, que se realiza aplicando vacío a través de la lámina de molde. Tal como se muestra esquemáticamente con referencia a la figura 19, variando el entorno de vacío espacial sobre el lado 1904 trasero de la lámina 1905 de molde (el lado que se orienta en sentido contrario a la superficie 1915 de elemento fundido), el contacto térmico en una región 1921 de elemento fundido de vacío fuerte pequeña, suministrado a través de un conducto 1909 de vacío fuerte a una fuente 1923 de vacío fuerte, puede forzarse entre el elemento 1915 fundido y la lámina 1905 de molde. Variando la posición de esta región 1921 de vacío fuerte, por ejemplo, arrastrando una línea de vacío fuerte hacia abajo de la longitud de una oblea 1919 de formación en el sentido indicado por la flecha M, el crecimiento lateral puede realizarse sin la necesidad de interfases lámina de molde/elemento fundido dinámicamente estables. Una realización de este tipo puede realizarse implementando una cámara 1921 de sobrepresión de vacío móvil por detrás de una lámina 1905 de molde que se mantiene en contacto continuo con la superficie 1915 de elemento fundido. La oblea 1919 se solidifica en o próximo a la ubicación de la cámara 1921 de sobrepresión móvil. Una vez que la oblea 1919 se forma, un nivel de fondo débil de vacío en el resto de la cámara 1903 de sobrepresión permite que la oblea 1919 permanezca temporalmente unida a la lámina 1905 de molde. Como se usa en el presente documento, un vacío fuerte se considera de entre aproximadamente 30 hasta aproximadamente 80 kPa, y un vacío débil está entre aproximadamente 1 y 30 kPa.

Otro procedimiento de realizar propagación lateral en el plano de la interfase sólido-líquido sin la necesidad de un menisco dinámicamente estable es variar espacialmente la tasa de transferencia térmica en la lámina de molde variando las propiedades y la geometría de la lámina de molde. En una forma de realización, tal como se muestra esquemáticamente con referencia a la figura 20, que es una vista en sección transversal, el vacío local a través del área de la lámina 2005 de molde se hace variar espacialmente retirando material en una conjunto de orificios 2016 ciegos en la cara 2004 trasera de la lámina 2005 de molde. Regiones de la lámina de molde con orificios ciegos conducirán vacío 2017 de manera más fuerte al lado 2006 de elemento fundido, llevando a la nucleación local debido a la transferencia térmica potenciada. Con la separación correcta de los orificios 2016 ciegos, estos granos nucleados localmente se propagarán lateralmente a través de regiones de la lámina de molde sin orificios ciegos, formando granos máximamente grandes.

En otra forma de realización, tal como se muestra esquemáticamente con referencia a la figura 21, se implantan insertos 2116 de material con difusividad térmica variable en diferentes ubicaciones a través de la lámina 2105 de molde. (Los artículos mostrados con números de referencia precedidos por 21 son análogos de los artículos precedidos por 20 mostrados en la figura 20, si no se observa de otra manera). Regiones de la lámina de molde que pueden conducir relativamente más calor en un periodo de tiempo relativamente corto tenderán a nuclear nuevos granos. Estos granos se propagarán a través de regiones de baja capacidad térmica, formando granos grandes cuando se encuentran granos vecinos. En una realización, insertos de grafito 2116 de alta difusividad térmica se embeben a intervalos regulares dentro de una lámina 2105 de molde de carburo de silicio de baja difusividad térmica. Los granos tenderán a nuclear en ubicaciones 2118 directamente por detrás de los insertos 2116 de alta difusividad térmica y a expandirse hacia fuera de esas ubicaciones.

En otra realización, mostrada esquemáticamente con referencia a las figuras 22A y 22B, una lámina 2205 de molde puede arrastrarse verticalmente, con exposición a un elemento fundido de silicio 2213 desde una dirección horizontal, en lugar de la dirección vertical, tal como se muestra en las realizaciones comentadas anteriormente. Para este procedimiento, el elemento 2213 fundido está contenido en un crisol 2211 con una pared 2229a más superficial que otra 2229b, de manera que cuando el nivel de la superficie 2215 del elemento 2213 fundido aumenta, se derrama por encima del borde 2229a más superficial. el nivel de elemento fundido podría implementarse por medio de un desplazador 2221 tal como se muestra o mediante cualquier procedimiento adecuado. la lámina 2205 de molde se coloca en contacto cercano con la pared 2229a corta de manera que en lugar de derramarse sobre el borde superior de la pared 2229a, el silicio 2213 fundido se pone en contacto con la lámina 2205 de molde, con un vacío 2217 que arrastra a través de un conducto 2207 desde el lado trasero 2206 de la lámina 2205 de molde. Una lámina 2219 semiconductor sólida se forma contra la lámina 2205 de molde. La lámina de molde se arrastra hacia arriba a lo largo del sentido de la flecha M. El vacío 2217 promueve la adhesión y la transferencia térmica en la lámina 2205 de molde, de manera similar a los casos descritos anteriormente, de exposición a elemento fundido desde abajo de la lámina 5 de molde. Vacío relativamente débil adicional puede aplicarse más arriba sobre la lámina de molde (no mostrado) para retener la lámina de silicio contra la misma a medida que la lámina de molde se mueve hacia arriba, hasta que se desee la liberación. Las paredes 2229a, 2229b de crisol, pueden ser no humectantes con respecto con el material fundido, de manera que un pequeño hueco entre el exterior de la pared de crisol y la lámina de molde no se rellenará por un elemento fundido que se desborda debido a la tensión superficial del silicio líquido. Un ejemplo de un material de crisol no humectante es el cuarzo.

Una ventaja de este procedimiento vertical es que se ayuda al vertido de líquido desde la oblea 2219 de formación por la gravedad. El sentido de movimiento M de la lámina 2205 de molde puede ser vertical tal como se muestra en la figura 22A, o la dirección puede inclinarse. Si la lámina 2205 de molde se inclina en sentido contrario al elemento 2213 fundido, la lámina 2219 de silicio sólido formada se soporta por la gravedad sobre la parte superior de la lámina 2205 de molde. Si la lámina de molde se inclina hacia el elemento fundido de manera que la lámina de silicio sólido formada esté por encima del elemento fundido, un vacío débil puede aplicarse sobre la parte superior de la lámina de molde para retener la lámina de silicio contra la lámina de molde hasta que se desee la liberación. El vertido óptimo de líquido se producirá cuando la gravedad actúe directamente opuesta a la fuerza de tensión superficial, que

para el silicio líquido contra el silicio sólido está en aproximadamente 11 grados.

Otros medios de realizar una unión lateral, progresiva y controlada de elemento fundido a la superficie de lámina de molde y una desunión de elemento fundido de la superficie de oblea formada, son situar la cara de formación de manera que pueda sumergirse en el interior de un elemento fundido verticalmente, con la superficie de cara de formación de un cuerpo de molde perpendicular a la superficie libre del elemento fundido. Esto se muestra esquemáticamente con referencia a las figuras 23A y 23B, sumergiéndose un cuerpo 2308 de molde microporoso hueco en el interior de un elemento 2313 fundido a lo largo del sentido de la flecha P, formando obleas 2319a y 2319b, sobre dos caras 2306a y 2306b de formación, respectivamente del cuerpo 2308 de molde, que tiene dos láminas 2305a y 2305b de molde. Dos superficies 2306a y 2306b de formación se muestran, las cuales son sustancialmente paralelas y se orientan opuestas entre sí. El cuerpo de molde puede ser de muchas formas diferentes, y puede tener dos, tres, cuatro, o más superficies de formación de molde. Cada una de las estructuras 2305a y 2305b que respaldan cada una de las superficies 2306a y 2306b de formación puede considerarse una lámina de molde tal como se usa el término en el presente documento. La figura 23B muestra el cuerpo 2308 de molde cerca del extremo de extracción del elemento 2313 fundido a lo largo de la dirección de la flecha W. Esto permite la formación de dos obleas por evento de formación, pero requiere un crisol relativamente profundo. La presión diferencial se proporciona a través de la cámara 2303 de sobrepresión, por ejemplo con un vacío 2317 que se extrae a través de un conducto 2307.

La discusión anterior, antes de la discusión más reciente de una realización de inmersión vertical, usa el término lámina de molde para referirse al elemento contra el que el material fundido se moldea para dar su forma y textura superficial finales. Las láminas de molde se han descrito como elementos en forma generalmente lámina, de una o más capas. Esta sección presente usa el término cuerpo de molde, que se refiere a un elemento generalmente tridimensional en forma distinta a lámina, compuesto por dos o más láminas de molde dispuestas en alguna relación geométrica entre sí. Cada lámina de molde tiene una superficie de formación, también denominada en el presente documento como cara de formación. No es necesario que los elementos molde individuales de un cuerpo de molde estén en forma de lámina. Por ejemplo, el cuerpo de molde puede ser completamente sólido, con un interior poroso que admite que un vacío se extraiga a través del mismo, con diferentes caras de formación orientadas hacia el exterior en sentido contrario entre sí alrededor de la periferia del cuerpo de molde. Como se usa en el presente documento y en las reivindicaciones, el término molde se usará para referirse a tanto o bien una lámina de molde o bien un cuerpo de molde, o bien las láminas de molde individuales de un cuerpo de molde, o bien la periferia exterior de un cuerpo de molde, que incorpora la forma y/o textura superficial que se moldea sobre la oblea formada.

En otra realización, tal como se muestra esquemáticamente con referencia a la figura 24, una lámina 2405 de molde fría se arrastra horizontalmente a lo largo del sentido de la flecha M, con exposición al elemento 2413 fundido de silicio que se reside por encima de la lámina 2405 de molde. El material 2413 fundido está contenido en un crisol 2411 que usa materiales no humectantes a lo largo del pequeño hueco a lo largo de la parte inferior de las paredes 2429a, 2429b, lo que evita que el elemento 2413 fundido de silicio se fugue, debido a la alta tensión superficial de silicio líquido. una pared 2429a puede elevarse para permitir la extracción de una lámina 2419 sólida, que se forma contra una lámina 2405 de molde arrastrando vacío desde el lado opuesto por medio de la cámara 2401 de sobrepresión de vacío, a través de cavidad 2403 de vacío para promover la adhesión y la transferencia térmica en el interior de la lámina 2405 de molde.

Tal como con los otros casos, comentados anteriormente, aunque la figura 24 muestra la lámina de molde arrastrándose horizontalmente (perpendicular a un campo gravitacional) este no es el caso necesariamente. La lámina de molde puede empujarse a lo largo de una línea que tiene una componente horizontal, con el material fundido ubicado gravitacionalmente por encima de la misma.

En todos los casos, el uso de vacío permite una gama de procedimiento mucho más amplia en cuanto a temperaturas y materiales de lámina de molde de las que son posibles sin vacío. Específicamente, el vacío puede promover la adhesión necesaria para un material que de otro modo sería no humectante. Ya que los materiales no humectantes también muestran normalmente baja nucleación y pueden soportar mayor subenfriamiento, esto es una ventaja importante en el control del tamaño de grano resultante de la lámina de silicio solidificada.

Tal como se muestra esquemáticamente con referencia a la figura 25, La liberación de la oblea 2519 formada de la lámina 2505 de molde puede estar asistida por uno o más pasadores 2593 pequeños, que se forzarán a través de orificios de ajuste apretado en la lámina de molde. Estos pasadores pueden residir dentro del área 2503 vacía de cámara de sobrepresión de vacío o en el exterior de la misma. Deberán preferentemente ponerse en contacto con la oblea 2519 recién formada y ayudar a empujar de la misma hacia fuera de la superficie de la cara 2506 de formación después de que se ha formado la oblea.

Otro aparato para lograr tal liberación se muestra esquemáticamente con referencia a la figura 26. Un bastidor 2693 forma un anillo alrededor del perímetro de la cara 2606 de formación. después de que se ha formado la oblea 2619, el bastidor 2693 se empuja de modo que sobresale más allá del plano de la cara 2606 de formación, empujando la oblea 2619 hacia fuera de la cara 2606 de formación. El bastidor puede extenderse alrededor del perímetro completo de la cara de formación, o solo sobre algún segmento del mismo.

Otro procedimiento es aplicar vacío sobre solo un área reducida de la parte interior de la superficie 4 de la lámina 5 de molde. La oblea tiende a formarse donde se aplica el vacío, aplicar por tanto el vacío sobre una región interior más pequeña puede dar como resultado una cobertura no completa de la cara 6 de formación por la oblea 19. Tal como se muestra con referencia a la figura 27, el área de vacío reducida puede lograrse mediante una cámara 5 2701a de sobrepresión de vacío más pequeña, o un recubrimiento 2712 no permanente sobre el lado trasero de la lámina 2705 de molde en el área en la que no se desea vacío. Ejemplos de tales recubrimiento son SiN por CVD (nitruro de silicio) o grafito pirolítico. La oblea 2719 formada, no se extiende entonces a los bordes afilados de la cara 2706 de formación, y puede liberarse de una superficie totalmente plana. Esto puede afectar tanto a las propiedades de liberación de la oblea como a la cantidad de deformación plástica que experimenta la oblea durante el evento de 10 formación. Los bordes afilados se ha encontrado que son sitios de unión potenciada para la oblea 2719 formada, y proporcionan acoplamiento mecánico fuerte entre la oblea 2719 y la cara 2706 de formación. Evitar que la oblea sea mecánicamente continua de borde a borde promueve el deslizamiento relativo entre la oblea y la cara de formación, reduciendo la cantidad de deformación plástica y creación y multiplicación de dislocaciones asociada y otros defectos cristalográficos. Cualquiera de tales dislocaciones y defectos surgirá de desigualdades en el coeficiente de 15 expansión térmica de la cara de formación y la oblea solidificada.

O, con una realización similar más simple, tal como se muestra esquemáticamente con referencia a la figura 28, la cara 2806 de formación puede tener extensiones 2893 más allá de la región 2803 de la cámara de sobrepresión de vacío, de modo que no se extrae material fundido a la lámina de molde cerca de sus bordes, Minimizando por tanto el efecto de unión más fuerte que surge cerca de los bordes y por tanto la oblea 2819 formada puede liberarse 20 fácilmente.

Tal como se muestra esquemáticamente con referencia a la figura 29, la cara 2906 de formación también puede ser no planar en la región de los bordes 2993, promoviendo una introducción gradual de elemento fundido a la superficie 2906 de cara de formación, y reduciendo además la oportunidad de unión mecánica de la oblea 2919 formada a la cara 2906 de formación.

Una cualquiera o más de estas técnicas para reducir el grado de unión de la oblea formada a la cara de formación, tal como una cámara de sobrepresión de vacío de área reducida, capa impermeable al gas, pasadores eyectores, placa desmoldadora, regiones borde no planares, etc., pueden combinarse con cualquier otra estructura mencionadas anteriormente o a continuación en el presente documento desarrollada para un fin similar. 25

Es necesario fijar la lámina 5 de molde al conjunto 8 de cámara de sobrepresión. Esto puede hacerse usando pasadores convencionales u otro mecanismo de unión mecánica. Como alternativa, tal como se muestra con referencia a la figura 27, la lámina 2705 de molde puede fijarse al conjunto 2708 de cámara de sobrepresión por medio de un vacío. En este caso, un recubrimiento 2712 no permeable a gas se proporciona alrededor de los bordes de una lámina 2705 de molde. Una cámara 2701b de sobrepresión de vacío secundaria se aplica sobre este área no permeable de la lámina 2705 de molde como medio de unión mecánica de la lámina de molde al conjunto 2708 de cámara de sobrepresión y cuando la cámara 2701a de sobrepresión se presuriza para la liberación de la oblea 2719 30 semiconductor solidificada. El área 2712 más delgada representada con cruces es un recubrimiento no permeable a gas tal como grafito pirolítico, que no permite el flujo de gas, que sirve a dos fines. En primer lugar, se evita que el vacío se aplique a la parte externa de la lámina 2705 de molde cerca de los bordes, por tanto, la oblea 2719 solidificada se define mediante el área no recubierta adyacente a la cavidad 2703a, en la que se aplica vacío. Esto mantiene los bordes de la oblea 2719 en sentido contrario a los bordes de la lámina 2705 de molde y asiste en la liberación de la oblea 2719. La cámara 2701b de sobrepresión de vacío externa puede aplicarse también sobre este área 2712 recubierta para unir mecánicamente la lámina de molde al conjunto 2708 de vacío cuando la cámara 2701a de sobrepresión interna no está aplicando vacío durante la liberación de la oblea 2719. Una ventaja de usar vacío como medio de unión mecánica es que no afecta a la masa térmica de la lámina 2705 de molde, que puede tener impacto en el grosor de la oblea. Otra ventaja es que puede proporcionar un medio más simple de carga y descarga automatizada de la lámina 2705 de molde, que debe someterse a ciclo a través de la unión y desunión muchas veces en el transcurso de un día de producción, a una tasa que puede oscilar desde una vez por minuto hasta una vez cada dos a tres horas, Dado un intervalo razonable de duración para la formación de cada oblea, y durabilidad de la lámina de molde. 35 40 45

El control de grosor objetivo y el control de uniformidad de grosor de la lámina de silicio formada es importante para el uso de las láminas de silicio en la fabricación de células solares debido a que pueden tener impacto en la resistencia y la masa térmica de obleas fabricadas a partir de las obleas de lámina de silicio formadas. Los presentes procedimientos pueden usarse para fabricar obleas semiconductoras individuales, o para láminas más grandes, a partir de las que pueden obtenerse obleas, por ejemplo para su uso en una célula solar. La presente discusión usará el término lámina, ya que es más general, pero se entenderá que esta discusión de grosor se refiere también a cuerpos formados como obleas. El grosor y la masa térmica subsiguiente pueden ser importantes cuando las obleas experimentan ciclos térmicos rápidos tales como cocción de metalización. Áreas delgadas de una lámina de silicio pueden dar como resultado debilidades locales, rotura de obleas durante el manejo y disminución de rendimiento en el procedimiento de células. 50 55

El grosor de la lámina de silicio desvelado en el presente documento se determina principalmente mediante el control de extracción de calor del elemento 13 fundido durante el evento de moldeo tal como se comentó 60

anteriormente. El flujo térmico por unidad de área del elemento fundido está influenciado por el material, el grosor, y la textura superficial del molde *lámina 5*, así como la presión de vacío aplicada y temperaturas de tanto el elemento 13 fundido como la lámina 5 de molde.

5 Tras el contacto, el contacto térmico íntimo entre el elemento 13 fundido y la lámina 5 de molde da como resultado la solidificación de una lámina 19 de silicio sólido, cuyo grosor crece basado en el calor de fusión y flujo térmico:

$$V = h * (T_{\text{elemento fundido}} - T_{\text{molde}}) / H_f$$

10 Donde V es velocidad del frente de solidificación, h es el coeficiente de transferencia térmica, T es la temperatura, y H_f es el calor de fusión volumétrico, $4,2 \times 10^9 \text{ J/m}^3$ para el silicio. Esta forma simple ignora el calor específico de sobrecalentamiento de elemento fundido, que es normalmente menos del 5 % de H_f tal como se comentó anteriormente. El caso planar con un frente de solidificación paralelo a la cara 6 de formación de la lámina de molde también puede aplicarse generalmente a un procedimiento continuo con la lámina de molde moviéndose a través de una superficie 15 de elemento fundido y un frente de solidificación será prácticamente paralelo, pero a un ángulo superficial con respecto a la lámina de molde. A partir de la bibliografía y la medición experimental, un valor de ejemplo de h es $\sim 5000 \text{ W/m}^2\text{K}$, que dará como resultado velocidades de frente de solidificación de $0,1 \text{ mm/s}$ y 1 mm/s para ΔT de $100 \text{ }^\circ\text{C}$ y $800 \text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente. Durante el periodo inicial después del contacto, el grosor de lámina de silicio puede controlarse mediante el tiempo que la lámina de molde está en contacto con el elemento fundido.

20 A medida que el calor se extrae del elemento fundido, la lámina 5 de molde se calentará basándose en su propia masa térmica y conductividad. Para el caso anterior con ΔT de $100 \text{ }^\circ\text{C}$, un flujo térmico de $5 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ a través de una lámina de molde con conductividad $k=50 \text{ W/mK}$ dará como resultado un gradiente de temperatura de $10 \text{ }^\circ\text{C/mm}$ en la lámina de molde. Si una delgada lámina de molde se usa con una parte trasera aislada, la temperatura del volumen de la lámina de molde se elevará hasta que se sature cuando $T_{\text{molde}} \approx T_{\text{elemento fundido}}$. Para una lámina de molde de grosor de 2 mm con calor específico $C_p = 3,5 \times 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$ y un ΔT inicial de $100 \text{ }^\circ\text{C}$, tendrá una capacidad térmica máxima de $7 \times 10^5 \text{ J/m}^2$, que corresponde a un grosor de lámina de silicio de $167 \text{ } \mu\text{m}$. Esto proporciona un mecanismo de estabilización para el control de grosor que es independiente del tiempo de residencia.

30 De forma similar, pueden diseñarse láminas de molde con grosor que varía de diferentes materiales, que incluyen una capa térmicamente aislante en una pila para lograr el grosor de lámina de silicio deseado y la uniformidad mejorada que es resistente contra variaciones en el tiempo de residencia. Como lámina de molde de ejemplo, mostrada esquemáticamente en la figura 30, puede usarse una capa 3008 de una lámina 3005 de molde con alta conductividad térmica con un grosor y temperatura inicial elegidos de manera que la capa 3008 se saturará térmicamente una vez que se ha formado un grosor deseado de lámina de silicio. Por saturar térmicamente, se entiende que no puede solidificar material semiconductor adicional, dado el gradiente de temperatura entre el elemento fundido y la capa 3008. Una capa 3007 interna más aislante retardará el calor flujo subsiguiente de modo que la tasa de solidificación será sustancialmente más lenta después de este punto de saturación inicial. La capa 3008 puede casi saturarse de manera que la tasa de solidificación se ralentiza a menos del 10 % de la tasa de solidificación original. Esto proporciona un medio más resistente de controlar el grosor debido a que disminuye la sensibilidad al tiempo de residencia.

40 La difusividad térmica del material de lámina de molde impondrá un límite adicional sobre la extracción de calor si la difusividad no es suficiente para extraer el calor a través de la lámina de molde y aumenta en su lugar la temperatura superficial. Una menor difusividad térmica puede favorecer mejoras en uniformidad de grosor de lámina, ya que un aumento en la temperatura superficial de lámina de molde disminuirá la velocidad de frente de solidificación y disminuirá la sensibilidad de grosor al tiempo de residencia.

45 Tras el contacto inicial entre la lámina de molde y el elemento fundido, la superficie del elemento fundido puede conformarse parcialmente conforme a la lámina de molde. Esto puede imponer textura de captura de luz tal como se comentó anteriormente y puede influir adicionalmente en la transferencia térmica. La presión de vacío aplicada a la superficie 4 trasera (la figura 1) de la lámina 5 de molde puede usarse para equilibrar las fuerzas de tensión superficial del silicio fundido y dictar el área superficial de contacto de la lámina de molde y el subsiguiente coeficiente de transferencia térmica. La figura 31A muestra, esquemáticamente en sección transversal, un ejemplo de una parte de una lámina 3105 de molde con una superficie texturizada sobre la cara 3106 de formación. La profundidad de las hendiduras 3110 puede ser menos de 1 micrómetro para una superficie pulida o puede ser de 20 a 50 micrómetros sobre una textura diseñada con fin. Bajo presión de vacío débil mostrado en la figura 31B, Hay una pequeña fuerza de accionamiento para deformar la superficie 3115 de elemento fundido y solo los puntos altos de la textura estarán en contacto íntimo con el elemento fundido para la extracción de calor. Los huecos restantes de espacio vacío entre el elemento fundido y la superficie de molde son relativamente aislantes y tienen el efecto de reducir el coeficiente de transferencia térmica global. Una vez que se forma una capa continua de sólido, no se producirá deformación adicional. Bajo presión de vacío más fuerte (hasta de 1 atm o mayor en una cámara de elemento fundido presurizada), el elemento fundido puede forzarse a más profundidad en el interior de las hendiduras antes de formar un sólido, aumentando de manera efectiva el área de contacto tal como se muestra en la figura 31C.

A medida que la lámina de molde se pone en contacto con la superficie de elemento fundido, que estaba inicialmente a la presión ambiente, la presión cambia para coincidir con la presión de vacío aplicada a la parte trasera de la lámina de molde con un tiempo constante de respuesta igual a:

$$T =$$

- 5 Donde M , μ , ρ , y T son los pesos moleculares, Viscosidad dinámica, densidad y temperatura del gas, R es la constante de los gases universal, y ϵ , κ y t son la fracción vacía, permeabilidad y grosor de la lámina de molde. A modo de ejemplo, usar las propiedades del argón a 1273 °K y una lámina de molde de 1 mm de grosor con permeabilidad de $1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, y un 5 % fracción vacía, $\tau = 15 \text{ ms}$. Los materiales de lámina de molde están disponibles con valores de permeabilidad que abarcan tres órdenes de magnitud, por lo que combinados con la selección de grosor, esta constante de tiempo puede adaptarse a entre varios segundos y menos de aproximadamente un milisegundo.

- 15 El tiempo disponible para que el líquido se deforme antes de solidificar una capa continuo se determina mediante el sobrecalentamiento del elemento fundido, calor específico, subenfriamiento antes de la nucleación y flujo térmico. Las condiciones de la lámina de molde y el elemento fundido pueden seleccionarse de manera que el tiempo disponible antes de la congelación es mayor que la constante de tiempo para la reducción de presión y la deformación de la superficie de elemento fundido. Tal tiempo, antes de la congelación, permite que el líquido se adapte mejor a la superficie de lámina de molde (similar a la que se muestra en la figura 31C) y aumenta el área de contacto y el subsiguiente coeficiente de transferencia térmica.

- 20 Un medio de aumentar el tamaño de grano es mediante el uso de una capa funcional entre la lámina de molde y el elemento fundido durante la formación de la oblea. Hay diferentes tipos de capas funcionales, que pueden proporcionarse por diferentes técnicas, y pueden funcionar de diferentes maneras. Además, estas capas funcionales pueden ser de muchos materiales diferentes.

- 25 Un tipo de una capa funcional proporciona una interfase de no nucleación, que permite la extracción de calor del elemento fundido y el subenfriamiento del líquido, llevando al crecimiento lateral de granos de cristal sólidos sin nucleación de nuevos granos, que da como resultado un tamaño de grano más grande. Otro tipo proporciona una barrera química frente a la difusión de contaminación de impurezas del material de la lámina de molde en el interior de la oblea semiconductora de formación. Aún otra capa funcional puede promover la nucleación de granos en ubicaciones deseadas (semillas). Aún otra función que una capa de este tipo puede proporcionar es evitar la adhesión del cuerpo formado a la lámina de molde.

- 30 Una capa funcional de no nucleación efectiva es una película delgada de óxido de silicio, por ejemplo, dióxido de silicio, por ejemplo una película de 500 nm de grosor. Experimentos de calorimetría de barrido diferencial (DSC) indican que el subenfriamiento en exceso de 150 °C puede mantenerse entre capas de silicio líquido y dióxido de silicio.

- 35 Materiales funcionales pueden proporcionarse sobre la cara de formación de lámina de molde, o sobre el elemento fundido, o ambos. Proporcionar un material funcional sobre el elemento fundido se comenta en primer lugar, seguido de una discusión sobre proporcionar el material funcional sobre la lámina de molde.

- 40 Un enfoque para crear una capa funcional de óxido de silicio se muestra esquemáticamente con referencia a las figuras 32A-32E para crear la capa funcional sobre la superficie 15 libre del elemento 13 fundido de silicio. Esto puede lograrse haciendo crecer una capa 3216 delgada de óxido de silicio directamente sobre el elemento fundido mediante la introducción de un tipo de gas oxidante que reacciona con el silicio presente sobre la superficie 15 de elemento fundido para formar una capa delgada de óxido de silicio flota sobre la superficie del elemento fundido (la figura 32B). La lámina 5 de molde se sumerge entonces en el elemento fundido (la figura 32C), Formando una oblea 3219 sobre la cara 6 de formación de la lámina 5 de molde. El conjunto de molde 3208 se extrae de la superficie 15 de elemento fundido con un vacío aplicado, levantando la oblea 3219 formada del elemento fundido. La oblea 3219 que se retira incluye una capa 3216 de recubrimiento del material funcional (la figura 32E). En este enfoque, la capa funcional se hace crecer de nuevo entre cada evento de moldeo de oblea.

- 50 Otro enfoque para crear una capa funcional de no nucleación se muestra esquemáticamente con referencia a las figuras 33A-33H. Este enfoque es para hacer crecer una capa funcional de este tipo sobre una superficie de silicio sólida, que se vuelve a fundir posteriormente para dejar solo el óxido de silicio. Debido a que la cinética de crecimiento de óxido y las propiedades de óxido difieren entre el silicio líquido y sólido, puede resultar beneficioso que sea posible hacer crecer la capa funcional sobre una superficie de silicio sólido, en lugar de sobre la superficie libre del elemento fundido de silicio. En este enfoque, la cara 6 de formación de la lámina 5 de molde se pone primero en contacto con la superficie 15 de elemento fundido, fabricando una oblea 3318 de sacrificio, como se ha descrito anteriormente, pero con granos pequeños. La oblea 3318 de sacrificio se libera de la lámina 5 de molde y flota sobre la superficie 15 del elemento 13 fundido. Un ambiente 3317 oxidante se introduce entonces en la superficie de la oblea de sacrificio, provocando el crecimiento de una capa 3316 de óxido. O bien simultáneamente con el crecimiento de la capa de óxido, o bien posteriormente, la oblea 3318 de silicio de sacrificio se funde en sentido contrario desde debajo por la alta temperatura del elemento 13 fundido, pero el óxido permanece durante un

tiempo. Finalmente, la lámina 5 de molde se pone en contacto con la capa 3316 funcional de óxido flotante, y se forma una oblea 3319 producción.

5 Otra función que una capa funcional puede realizar es como barrera química para evitar, por ejemplo, la difusión de impurezas desde la lámina de molde a la oblea semiconductor de formación. Otra función que una capa funcional puede realizar es evitar la adhesión entre la lámina de molde y la lámina de silicio solidificada y facilitar de ese modo la liberación. Una capa funcional también puede frenar la nucleación de grano descontrolada en el cuerpo de formación. La sílice puede servir para cada uno de estos fines. Un material funcional diferente puede promover también la nucleación de grano en ubicaciones deseadas, si está adaptado espacialmente.

10 Otro enfoque para crear una capa funcional entre la superficie de elemento fundido y la lámina de molde es creando una capa funcional de este tipo sobre la superficie de la lámina de molde por sí misma, por ejemplo depositando una capa funcional de dióxido de silicio o nitruro de silicio sobre la lámina de molde de grafito. La figura 30 muestra una capa 30014 funcional de este tipo sobre una lámina 3005 de molde. Un enfoque para crear una capa funcional de este tipo es depositar directamente la capa funcional en la forma final, por ejemplo, mediante deposición química en fase vapor (CVD), o mediante deposición física en fase vapor (PVD). Capas de nitruro de silicio ricas en hidrógeno se depositan rutinariamente sobre células solares de silicio para su uso como recubrimientos antireflectantes mediante deposición química en fase vapor potenciada por plasma (PECVD). Tanto estas capas de nitruro de silicio como las depositadas por haz de electrones de SiO_2 se ha encontrado que son efectivas para formar una capa de amortiguación de presión de nucleación sobre la lámina de molde.

20 Otro enfoque es depositar una capa de material precursor, que se convierte posteriormente en la capa 3014 funcional final. Por ejemplo, una capa delgada de silicio puede depositarse sobre la lámina de molde por evaporación de haz de electrones y convertirse posteriormente en dióxido de silicio mediante un revenido térmico en presencia de gas oxidante.

25 Otra implementación de a capa funcional sobre una cara de formación es el uso de una capa de polvo. Esta capa de polvo puede consistir en polvos de material cerámico, por ejemplo carburo de silicio, nitruro de silicio, o dióxido de silicio. La capa de polvo puede ser de un único componente o multicomponente, con polvos de diferente composición y/o distribución de tamaño de partículas. Esta capa de polvo puede aplicarse por pulverización y secado posterior de una lechada.

30 En cada una de las implementaciones descritas anteriormente, la capa funcional creada puede persistir durante el moldeo de múltiples obleas sin renovar o redepositar la capa funcional. Sin embargo, puede ser necesario también actualizar o redepositar la capa funcional entre cada evento de moldeo para obtener una funcionalidad óptima. La porosidad de la capa funcional actualizada, convertida o depositada de ser aún suficiente para permitir el paso de gas a través del plano de la capa funcional de manera que pueden funcionar el vacío o el mecanismo de unión de presión diferencial.

35 De ese modo, pueden elegirse materiales funcionales del grupo que incluye pero no se limita a: óxido de silicio, dióxido de silicio (sílice), carburo de silicio, nitruro de silicio, oxinitruro de silicio, oxicarburo de silicio, y nitruro de boro y silicio por sí mismo (como semilla).

Lo anterior ha comentado el uso de una lámina de molde compuesta por diversos materiales, tales como: grafito, carburo de silicio, nitruro de silicio, sílice, oxinitruro de silicio, oxicarburo de silicio, carburo de boro, nitruro de boro y aleaciones de estas que incluyen oxinitruro de silicio y también, bajo determinadas circunstancias, óxido de aluminio.

40 El silicio por sí mismo puede ser un material excelente sobre el que crecer obleas silicio, debido a su disponibilidad a muy alta pureza, propiedades térmicas bien entendidas, y fácil de hacer crecer o depositar compuestos basados en silicio tales como dióxido de silicio, nitruro de silicio, carburo de silicio para usar como capa funcional, comentada anteriormente. Más específicamente, se ha hallado que el dióxido de silicio tiene excelentes propiedades de no nucleación y de barrera química y puede hacerse crecer sobre silicio. De ese modo, será deseable usar una lámina 5 de molde fabricada de silicio, por ciertos motivos. Un problema importante es que el silicio no es permeable y por tanto no puede transmitir un vacío o presión diferencial al elemento fundido. Sin embargo, se han desarrollado diversos procedimientos para fabricar silicio permeable, y se comentan a continuación.

50 Tal como se muestra esquemáticamente con referencia a la figura 34 para una sección transversal esquemática, orificios 3432 pasantes de láser pueden cortarse en sustratos 3405 de silicio 3434 en volumen delgado (de 100 a 300 μm de grosor) con un diámetro de orificio pasante de $<3 \mu\text{m}$ sobre al menos una cara del sustrato de silicio. (Como se usa en el presente documento, el término lámina de molde se refiere a un elemento de molde acabado, que tiene una cara de formación y una cara anversa. El material fundido se presenta contra la cara de formación de una lámina de molde. En algunos casos, un cuerpo de molde puede usarse, que tiene diversas láminas de molde dispuestas en relación entre sí. El término sustrato se usa en el presente documento para referirse a material que se procesa para pasar a ser una lámina de molde). El tamaño y paso del orificio 3432 pasante pueden variarse para controlar propiedades de la oblea tales como grosor y microestructura. Después de crear porosidad cortando orificios, el sustrato 3405 puede procesarse adicionalmente oxidando o recubriendo con óxidos, nitruros y carburos de silicio para formar una capa 3431 funcional externa deseada. Otros procedimientos de procedimiento tal como

ataque químico con iones reactivo pueden usarse también para crear orificios pasantes.

Si se desean sustratos 3505 más gruesos tal como se muestra esquemáticamente con referencia a la figura 35, pasará a ser poco práctico cortar por láser orificios pasantes con un diámetro <3 μm . Un enfoque alternativo será para cortar grandes orificios 3532 pasantes cónicos con diámetros sobre una cara 3531 del sustrato 3505 de 100 a 1000 μm y de 10 a 100 μm en la cara 3533 opuesta. El cuerpo 3534 principal del sustrato 3505 es silicio en volumen. Estos orificios pasantes pueden rellenarse entonces con polvos de silicio, carburo de silicio, nitruro de silicio, sílice o una combinación de todos o algunos de estos compuestos basados en silicio. Los orificios pasantes pueden rellenarse, por ejemplo, aplicando una lechada de polvos deseados con una mezcla de tamaños de partícula que es consistente con la dimensión de los orificios pasantes y la permeabilidad deseada del sustrato a la cara del sustrato con los orificios de gran diámetro. Más específicamente, partículas de casi el diámetro del orificio pequeño deben incluirse para permitir que la mezcla de polvos se suelde de manera segura en el interior del orificio y partículas con un tamaño mucho menor deben usarse para adaptar la permeabilidad. El vacío puede aplicarse entonces desde la cara 3533 del sustrato con los orificios pequeños para agrupar las partículas de polvo en los orificios pasantes. El sustrato puede tratarse térmicamente en atmósfera inerte o reactiva para oxidar, nitruro, carburo, la reacción de unión, o sinterizar la mezcla de polvo para conectar y densificar el polvo en el interior de los orificios pasantes.

Ambos procedimientos que usan los orificios pasantes de corte por láser descritos hasta ahora dan como resultado silicio permeable con permeabilidad no uniforme macroscópicamente. Esto puede desearse para el control de nucleación. Si se desea permeabilidad uniforme, el silicio en volumen necesita hacerse permeable con poros a una escala nanométrica. Procedimientos para crear capas delgadas de silicio poroso atacando químicamente en $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}_2$ con una capa catalizadora de metal tal como plata, oro, cobre se han descrito en la bibliografía (por ejemplo por C. Chartier y col. en el Acta Electroquímica 53 (2008) 5509-5516).

que usa un ataque químico en $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}_2$ asistido por plata (Ag), pueden fabricarse diversos tipos nuevos de sustratos para el crecimiento de obleas de silicio a partir de un elemento fundido de silicio. La figura 36 muestra un sustrato 3605 de silicio poroso grueso (de 100 a 1000 μm de grosor) con silicio 3631 poroso oxidado sobre la superficie. Durante el procedimiento de ataque químico se generan dos tipos de silicio poroso. Partícula de plata que se hunden en el silicio dejan atrás grandes macroporos con cientos de nanómetros de (nm) diámetro. Se genera silicio nanoporoso en la superficie de la muestra y sobre las paredes de poro. Este silicio nanoporoso puede retirarse con ataque químico alcalino tal como de NaOH o KOH . El silicio nanoporoso es mucho más reactivo que el silicio macroporoso y puede quedarse en su sitio si, por ejemplo, se desea una capa de SiO_2 gruesa. Después del ataque químico de silicio, una etapa de limpieza en HNO_3 se recomienda para retirar cualquier plata residual de la muestra. Para formar la capa de SiO_2 , una oxidación térmica entre 900 $^\circ\text{C}$ y 1300 $^\circ\text{C}$ puede realizarse en un ambiente que contiene oxígeno. El grado de permeabilidad puede ajustarse mediante la cantidad de Ag depositada, el tiempo de ataque químico, la razón de $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}_2$ y la temperatura del baño. La figura 36 muestra un ejemplo de un sustrato 3605 fabricado por este procedimiento con silicio poroso parcialmente oxidado en el centro 3634 y capas de SiO_2 poroso sobre la superficie 3631.

Una desventaja de los procedimientos descritos en la bibliografía es que no es posible fácilmente crear áreas locales de silicio poroso mientras se mantiene un acabado liso en áreas adyacente. A lo largo del tiempo requerido para atacar químicamente de manera completa a través de un sustrato grueso, parte de la plata pasa a disolverse en la solución de ataque químico y el ataque químico se cataliza sobre la superficie competa del sustrato, aunque la capa de plata se cubra con máscara antes del ataque químico en $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}_2$. Este problema puede resolverse mediante técnicas desarrolladas por los inventores presentes de las mismas. La figura 37 muestra un flujo de procedimiento preferente para crear sustratos con áreas de silicio poroso.

Los sustratos de silicio se limpian 3761 y entonces se metalizan a partir de una disolución de nitruro de plata 3762. Entonces permitiendo 3765 que la plata con el silicio subyacente que usa, por ejemplo, un láser a baja potencia que se ajusta después de la deposición 3762 de la capa de semilla de plata, regiones de aleación silicio plata pueden crearse sobre la superficie de muestra. Cualquier plata sin alea puede retirarse entonces 3772 en ácido nítrico concentrado dejando áreas de silicio limpio adyacentes a áreas con aleación de silicio plata, debido a que la aleación Ag-Si no ataca químicamente por el ácido nítrico. La aleación de Ag-Si actuará aún como catalizador pero no contaminará el baño de ataque químico y por tanto los sustratos de silicio en volumen con clavijas de silicio poroso pueden fabricarse atacando químicamente el sustrato preparado de tal manera en una disolución $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}_2$ 3766. La figura 38 muestra un sustrato de este tipo después de la oxidación 3774. Las clavijas 3832 de silicio poroso oxidado penetran el silicio en volumen 3834. Las áreas de silicio en volumen se recubren con SiO_2 completamente denso 3831. Si una capa gruesa de SiO_2 poroso se desea por encima del silicio en volumen, el sustrato puede sumergirse 3767 en una disolución de ataque químico dopada con Ag (aproximadamente de 100 ppm de Ag es suficiente) antes de o después de que las áreas aleadas se han atacado químicamente de manera completa 3766. Esto dará como resultado una capa gruesa de silicio nanoporoso en la superficie de la muestra, que dará como resultado una capa de SiO_2 porosa gruesa después de la oxidación (3834 será SiO_2 poroso en lugar de SiO en volumen en este caso). Después del ataque químico de silicio final 3766 o 3767, la muestra debe limpiarse enjuagando 3768 en agua DI. Si no se desea silicio poroso la muestra entonces puede atacarse químicamente en disolución cáustica débil 3769 tal como del 1 % de NaOH por ejemplo. En todos los casos, los sustratos deben limpiarse en ácido nítrico 3770 para retirar el metal de Ag residual. Con este procedimiento, la estructura tridimensional del silicio en volumen y el silicio poroso pueden crearse. Debido a que el silicio poroso es más reactivo que el silicio en volumen, estructuras

tridimensionales de silicio en volumen y productos de reacción de silicio, tal como por ejemplo SiO₂ o nitruro de silicio pueden crearse. Además de suprimir la nucleación con una capa de SiO₂, tanto el control de vacío como el control de transferencia térmica permiten el control adicional de microestructura de obleas crecidas sobre estos sustratos.

- 5 Tal como se indicó antes, un dióxido de silicio crecido térmicamente actúa bien como una capa de supresión de nucleación cuando se hace crecer silicio. Obleas de silicio con granos relativamente grandes (de diámetro de grano de 3 a 5 veces el grosor de la oblea) han crecido sobre sustratos de silicio con orificios pasantes de láser o porosidad generada por ataque químico asistido por metal. La microestructura se controlaba por la densidad y el tamaño de orificios pasantes de láser. La nucleación de granos se potenció en el lugar de los orificios pasantes y suprimida en cualquier otro, mostrando un alto grado de control de nucleación. El silicio casi monocristalino se creció sobre sustrato de silicio poroso oxidado con el sustrato actuando como semilla para la oblea crecida.

- 10 De ese modo, la lámina de molde puede estar formada de silicio poroso, tal como se comentó, y, tal como se indicó anteriormente, la lámina de molde puede estar compuesta por: grafito, carburo de silicio, nitruro de silicio, sílice, oxinitruro de silicio, oxicarburo de silicio, carburo de boro, nitruro de boro, y combinaciones de los mismos, junto con combinaciones de silicio poroso, tal como se comentó anteriormente.

- 15 Además de la discusión anterior se ha referido a una lámina de molde que tiene una superficie de formación texturizada. Sin embargo, invenciones desveladas en el presente documento son también útiles con láminas de molde que tienen una superficie de molde sin texturizar, sustancialmente lisa, e incluso sustancialmente pulida.

- 20 Un aspecto central de las invenciones desvelada en el presente documento es el uso de un diferencial de presión a través de una lámina de molde y la formación de una oblea sobre la misma, para controlar la solidificación, y adhesión del semiconductor, normalmente silicio, a la lámina de molde y, mediante la última relajación del diferencial de presión, para permitir la liberación de la oblea formada. Este aspecto aumenta en gran medida el intervalo de parámetros y materiales disponibles para solidificar una lámina sobre un sustrato y también reduce el coste. La lámina de molde puede estar (aunque no es necesario) más fría e incluso sustancialmente más fría que el elemento fundido, debido a que, se crea adhesión por diferencial de presión y no depende de la humectación. El uso de temperaturas de lámina de molde inferiores también aborda la naturaleza de materiales de lámina disponibles. La liberación por reducción o incluso la inversión del diferencial de presión proporciona un procedimiento realizable, económico y rápido de liberación que no se basa en los recubrimientos de función de liberación y su replicación.

- 25 El calor se extrae casi exclusivamente a través del grosor de la oblea de formación (y no a lo largo de su longitud). En consecuencia, la interfase entre líquido y sólido es sustancialmente paralela a la superficie de lámina de molde de formación o a un ángulo agudo relativamente pequeño al mismo. Por tanto, la temperatura del cuerpo semiconductor de solidificación es sustancialmente uniforme a través de su anchura, dando como resultado tensiones bajas y baja densidad de dislocación y por tanto calidad cristalográfica más alta. La segregación de impurezas de la interfase al volumen del elemento fundido puede tener lugar, dando como resultado la purificación del material durante el crecimiento. Los dopantes con bajos coeficientes de segregación (tal como galio en silicio) pueden usarse as cada oblea pueden hacerse crecer a partir de un elemento fundido con la misma concentración de dopantes y por tanto tienen la misma concentración de dopantes.

- 30 La lámina de molde debe permitir el flujo de gas a través de la misma para crear y mantener un diferencial de presión y este puede conseguirse por la porosidad a través del área completa de la lámina o por la porosidad concentrada que se distribuye sobre la lámina. La lámina de molde puede ser sustancialmente del tamaño de una única oblea o el tamaño de múltiples obleas, por ejemplo en una forma de banda. La introducción del elemento fundido a la lámina de molde puede implementarse en una amplia variedad de configuraciones que incluyen: el contacto de área completo con la parte superior de un elemento fundido de material; recorriendo un contacto de área parcial de elemento fundido con la lámina de molde, si es horizontal o vertical, o en entre; y sumergiendo la lámina de molde en el interior de un elemento fundido. el grosor de la capa solidificada puede controlarse variando la temperatura de la lámina de molde, el grosor de la lámina de molde, la temperatura del elemento fundido y la duración de contacto entre la lámina de molde y el elemento fundido. El tamaño de grano puede controlarse por la temperatura inicial de la lámina de molde, introduciendo la lámina de molde al elemento fundido en un medio direccional. Mediante medios direccionales, esto significa, progresivamente, con una parte de la lámina de molde que se pone en contacto el material fundido en primer lugar, y luego partes adicionales contactan con el material fundido, en lugar de la lámina de molde completa que se pone en contacto con el material fundido todo de una sola vez. El tamaño de grano también puede controlarse por la naturaleza del material en la interfase entre la lámina de molde y la superficie de elemento fundido, especialmente por el uso de materiales funcionales que reducen la tendencia a la nucleación. La retirada de la oblea formada del elemento fundido se asiste proporcionando un mecanismo para el exceso de desprendimiento, cuyo elemento fundido sin solidificar de otro modo se mantendría por capilaridad. La retirada de la oblea de la lámina de molde puede ser por reducción o inversión del diferencial de presión o asistida mecánicamente. Los diversos procedimientos de introducción de elemento fundido, control de solidificación, retirada de elemento fundido en exceso y retirada de oblea pueden combinarse de cualquier manera razonable. Compensar la pérdida de material mediante la retirada de la lámina solidificadas, el material debe añadirse al elemento fundido. Esto puede hacerse o bien añadiendo piezas sólidas, o bien añadiendo material fundido, cuyo material se fundió en un contenedor separado. El reemplazo puede suceder entre la formación de

cada oblea, entre la formación de lotes de obleas, o en base continua. El material que se añade debe contener también dopantes, normalmente en aproximadamente la misma concentración según se desee en las obleas solidificadas. Sin embargo, el nivel de dopaje puede variarse para mantener el control más ajustado sobre el dopaje de las obleas solidificadas.

- 5 Una realización útil de una invención de procedimiento del mismo tiene las siguientes características. Promover granos grandes, el elemento fundido se introduce a la lámina de molde de una manera progresiva, por ejemplo, usando un procedimiento de disposición inclinada tal como se describe con referencia a la figura 9A y la figura 9B. Un material funcional que reduce la nucleación de grano se usa también, si es sobre la lámina de molde o sobre la superficie del elemento fundido. El menisco se desune con la asistencia de un elemento de control de menisco. La lámina de molde es más grande que la oblea que va a formarse y el vacío se confina a solo una parte de la lámina de molde para facilitar la liberación.

10 Aunque partes de esta descripción se han centrado en la fabricación de láminas de silicio para procesarse posteriormente en células solares, los procedimientos desvelados en el presente documento no están limitadas a esta aplicación. Es posible que el tamaño de grano y la estructura del silicio formado no será suficiente para permitir para la fabricación de células solares directamente sobre el láminas de silicio fabricadas mediante estos procedimientos. Debido a que la solidificación está teniendo lugar a través del grosor de la oblea, existe el potencial para expulsar impurezas en el interior del volumen del elemento fundido, Tal como se comentó anteriormente, y por tanto para refinar químicamente el silicio durante el procedimiento. De ese modo, puede ser que mientras que alguna lámina fabricada directamente tiene granos demasiado pequeños para soportar la eficiencia más alta de células solares, puede ser posible conseguir células de eficiencia razonable (quizás del 15 %) a un coste extremadamente bajo.

Tal como, las láminas de Si pueden usarse como materia prima para la tecnología de recristalización en cápsula (RIC) descritos en los inicios de esta descripción.

25 Además, el material que se forma no necesita ser silicio. Otro material semiconductor puede usarse, tal como semiconductores elementales tales como germanio y semiconductores compuestos, tal como arseniuro de galio.

Muchas técnicas y aspectos mecánicos de las invenciones se han descrito en el presente documento. El experto en la técnica entenderá que muchas de estas técnicas y aspectos mecánicos pueden usarse con otras técnicas desveladas, aunque no se han descrito específicamente en su uso juntos.

30 El procedimiento desvelado en el presente documento incluye un procedimiento de fabricación de una preforma de lámina semiconductor para posterior recristalización, poniendo en contacto una lámina de molde porosa fría con un elemento fundido de material semiconductor, desarrollando un diferencial de presión a través de las superficies delantera y trasera de la lámina de molde y separando de ese modo una lámina delgada semiconductor a partir del elemento fundido, Recristalizando la lámina de preforma formada, tal como se describe en las solicitudes de RIC, y entonces usan la lámina semiconductor como sustrato de célula solar. Otro procedimiento es un procedimiento de fabricación de un sustrato de célula solar usando la lámina de molde fría y el elemento fundido semiconductor, que no necesita recristalizarse, y que puede tener o no una superficie texturizada. Muchas variaciones sobre estos procedimientos se han comentado, incluyendo los medios mediante los que el material fundido y la lámina de molde coinciden (inmersión e inclinación; elemento fundido elevado por debajo de la lámina de molde; elemento fundido por encima de la lámina de molde; elemento fundido del lado de una lámina de molde vertical; sumergir un cuerpo de molde en el interior de un elemento fundido verticalmente. Otras variaciones se refieren al procedimiento de aplicar un diferencial de presión; incluyendo usar un vacío completo o parcial con una superficie fundida a presión atmosférica, usando un horno de elemento fundido presurizado, aplicar presión uniforme sobre la lámina de molde completa, o aplicar diferentes regímenes presión en diferente ubicaciones de la lámina de molde. Muchos procedimientos y aparato diferentes para retirar el cuerpo solidificado desde la lámina de molde se han comentado, incluyendo reducir el diferencial de presión a través de la lámina de molde; aplicar presión positiva, pasadores mecánicos, conformar la lámina de molde para evitar la adhesión, proporcionar un material funcional que actúa como molde liberación, y usar una vacío de cámara de sobrepresión dual junto con un recubrimiento impermeable a gas sobre una parte de la lámina de molde.

50 Por ejemplo, puede usarse cualquier procedimiento adecuado para extraer un vacío a través de una lámina de molde. Cualquier semiconductor usarse como el material para la preforma de lámina. Diversas técnicas pueden usarse para evitar que el líquido se adhiera a la parte inferior de la preforma de lámina formada. Diferentes materiales funcionales pueden usarse para diferentes fines. Diferentes procedimientos de introducción del elemento fundido a la lámina de molde pueden usarse.

55 Artículos de fabricación desvelados en el presente documento incluyen preformas de lámina semiconductor fabricadas según los procedimientos mencionados anteriormente, o bien adecuados para su uso con o bien sin recristalización, con o sin superficies texturizadas. Artículos adicionales de los mismos incluyen las diversas configuraciones de láminas de molde, incluyendo aquellas con orificios ciegos a través de las mismas, o bien rellenas con un material poroso u otro material, o sin rellenas; en capas, con capas de diferentes grosores y difusividades térmicas; láminas de molde que son más grandes que el cuerpo semiconductor que va a solidificarse,

y/o que tienen bordes redondeados; teniendo material funcional de láminas de molde en la superficie de formación; láminas de molde que tienen superficies de formación plana o texturizada. Aún más artículos del mismo son láminas de molde compuestas por silicio poroso, con o sin aperturas macroscópicas a través de las mismas, que pueden rellenarse con material poroso o sin rellenar; y con o sin una superficie externa, por ejemplo de sílice, u otro material.

- 5 La divulgación con respecto a esto de aparato de fabricación incluyen disposiciones de estructura de soporte y artesas para la cámara de sobrepresión y la lámina de molde, tal como se describe anteriormente para un modo semicontinuo de fabricación, y la cámara de sobrepresión y el conjunto de lámina de molde; cámara de sobrepresión dual con habilidad de arrastre; cámara de sobrepresión dual para la lámina de molde y una unión y liberación de oblea formada. Un aparato adicional de la misma incluyen los diversos aparatos para producir una parte elevada en un elemento fundido, incluyendo un rebosadero móvil, una bomba y una ranura elevada para bombear semiconductor fundido hacia arriba a través del mismo, y equipo de magnetohidromecánica. Un aparato adicional de la misma incluye las diferentes disposiciones para presentar material fundido en una lámina de molde fría, incluyendo aquellas en las que el material fundido está por debajo de la lámina de molde, aquellas en las que el material fundido se presenta en la lámina de molde desde por encima (gravitacionalmente) y aquellas en las que el material fundido se presenta en una lámina de molde desde un lado.

Aunque se han mostrado y descrito realizaciones particulares, se entenderá por los expertos en la técnica que diversos cambios y modificaciones pueden fabricarse sin alejarse de la divulgación en sus aspectos más amplios. Se pretende que toda materia contenida en la descripción anterior y mostrada en los dibujos adjuntos deben interpretarse como ilustrativas y no en sentido limitante.

- 20 La presente solicitud proporciona un procedimiento tal como se expone en las reivindicaciones.

La discusión anterior debe entenderse como ilustrativa y no debe considerarse limitante en ningún sentido. Aunque las invenciones se han mostrado particularmente y descrito con referencias a realizaciones preferentes de las mismas, se entenderá que los expertos en la técnica que diversos cambios en forma y detalles pueden hacerse en la misma sin alejarse del alcance de las invenciones tal como se define por las reivindicaciones.

25

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de fabricación de un cuerpo (19) semiconductor, comprendiendo el procedimiento las etapas de:
 - a. proporcionar un material (13) semiconductor fundido, que tiene una superficie;
 - b. proporcionar un molde (5) poroso, que comprende una superficie (6) de formación;
 - 5 c. proporcionar un régimen de presión diferencial de manera que la presión en al menos una parte de la superficie (6) de formación es menor que la presión en la superficie (15) de material fundido;
 - d. poner en contacto la superficie (6) de formación con el material (13) fundido durante una duración de contacto de manera que, durante al menos una parte de la duración de contacto, el régimen de presión diferencial se proporciona de manera que un cuerpo (19) de material semiconductor solidifica sobre la superficie (6) de formación;
 - 10 e. provocar el movimiento de la superficie (6) de formación en relación con el material (13) semiconductor fundido, con el cuerpo (19) solidificado sobre la superficie (6) de formación; y
 - f. desprender el cuerpo (19) solidificado de la superficie (6) de formación.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que desprender el cuerpo (19) solidificado de la superficie (6) de formación incluye reducir el grado del régimen de presión diferencial, contribuyendo de ese modo a desprender el cuerpo (19) solidificado de la superficie (6) de formación.

3. Procedimiento según la reivindicación 1 o la reivindicación 2, comprendiendo el molde (5) una única superficie (6) de formación, que se pone en contacto con una superficie (15) del material semiconductor fundido.

4. Procedimiento según la reivindicación 1 o la reivindicación 2, que además comprende, antes de la etapa de poner en contacto la superficie (6) de formación con el material (13) fundido, la etapa de inclinar la superficie (6) de formación en relación con la superficie (15) del material (13) fundido, de modo que solo una parte de la superficie (6) de formación hace contacto inicial con la superficie (15) del material (13) fundido.

5. Procedimiento según la reivindicación 1 o la reivindicación 2, que además comprende la etapa de proporcionar un material funcional entre la superficie (6) de formación y el material (13) fundido, el material funcional elegido para contribuir a una función elegida del grupo de:
 - a. suprimir la nucleación de crecimiento de grano;
 - b. evitar el paso de impurezas desde el molde (5) hasta el cuerpo (19) semiconductor solidificado;
 - c. mejorar la liberación del cuerpo (19) semiconductor solidificado de la superficie de formación; y
 - d. potenciar la nucleación de crecimiento de grano en ubicaciones específicas del cuerpo (9) semiconductor solidificado; y
 - 30 e. permitir la extracción de calor del material (13) semiconductor fundido.

6. Procedimiento según la reivindicación 5, comprendiendo la etapa de proporcionar un material funcional: al menos una de las etapas de:
 - proporcionar el material funcional a la superficie (6) de formación; y
 - 35 proporcionar el material funcional a la superficie (15) del material (13) fundido.

7. Procedimiento según la reivindicación 1 o la reivindicación 2, que además comprende proporcionar un agente de nucleación preferencial en una ubicación entre la superficie (6) de formación y el material (13) fundido, antes de la etapa de poner en contacto la superficie (6) de formación con el material (13) fundido.

8. Procedimiento según la reivindicación 1 o la reivindicación 2, que además comprende la etapa de aplicar un elemento de control de menisco no humectante para desprender material (887) fundido adherente del cuerpo (19) solidificado.

9. Procedimiento según la reivindicación 1 o la reivindicación 2, que además comprende la etapa de controlar la nucleación de crecimiento de grano en ubicaciones seleccionadas de la superficie (6) de formación.

10. Procedimiento según la reivindicación 1 o la reivindicación 2, que además comprende al menos una etapa seleccionada del grupo que consiste en controlar la nucleación de crecimiento de grano y controlar la direccionalidad de crecimiento, en el que la al menos una etapa se lleva a cabo usando al menos una técnica seleccionada del grupo que consiste en:
 - a. proporcionar el molde (5) con un grosor espacialmente variado;
 - b. proporcionar un diferencial de presión que varía espacialmente con respecto a la superficie (6) de formación;
 - 50 c. proporcionar el molde (5) con aislamiento térmico espacialmente variado;
 - d. proporcionar la superficie (6) de formación con una textura espacialmente variada;
 - e. proporcionar el molde (5) con una difusividad térmica espacialmente variada;
 - f. proporcionar un perfil de temperaturas específico por área en la cara (6) de formación; y
 - g. proporcionar un germen cristalino en una ubicación sobre la superficie (6) de formación que primero se pone

en contacto con el material (13) fundido.

11. Procedimiento según la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en el que además:

- 5 a. la etapa de proporcionar material (13) fundido comprende proporcionar material (13) fundido en un contenedor (21), teniendo el contenedor (21) al menos una pared, de manera que existe un menisco (23) del material (13) fundido con una curvatura convexa orientada hacia el lado contrario del contenedor (21), que tiene parte más superior que está por encima de la pared; y
- b. la etapa de poner en contacto la superficie (6) de formación con el material (13) fundido comprende pasar la superficie (6) de formación contra el menisco (23) convexo.

10 12. Procedimiento según la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en el que además el molde (5) tiene una capacidad térmica limitada, de manera que la temperatura de la superficie (6) de formación aumenta sustancialmente hasta una temperatura aproximadamente igual a la del material (13) fundido, de manera que tras esto, no se solidifica material (13) fundido adicional.

15 13. Procedimiento según la reivindicación 1 o la reivindicación 2, comprendiendo la etapa de proporcionar material (13) fundido proporcionar material (13) fundido en un recipiente, de manera que el material (13) fundido tiene una profundidad de menos de aproximadamente cinco mm.

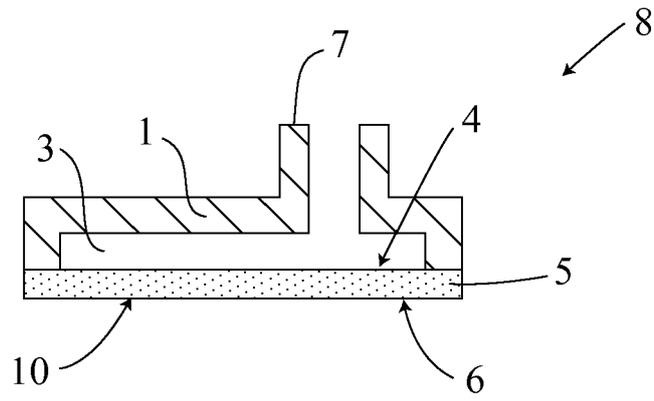


Fig. 1

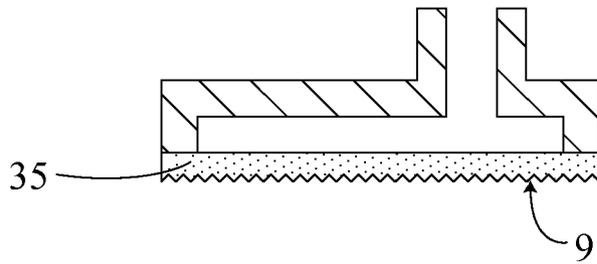


Fig. 2

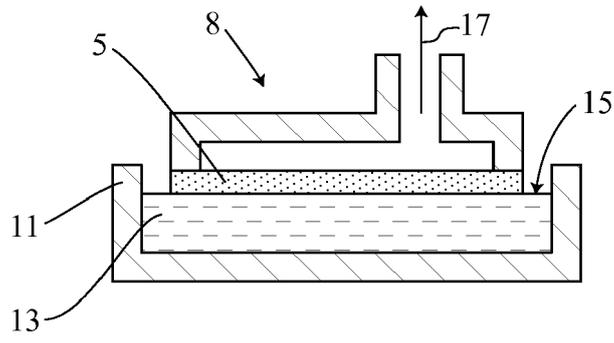


Fig. 3A

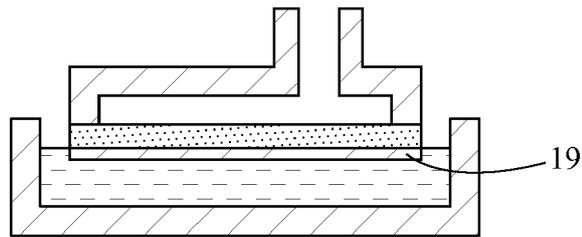


Fig. 3B

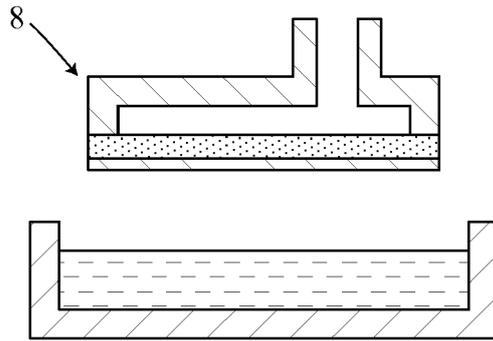


Fig. 3C

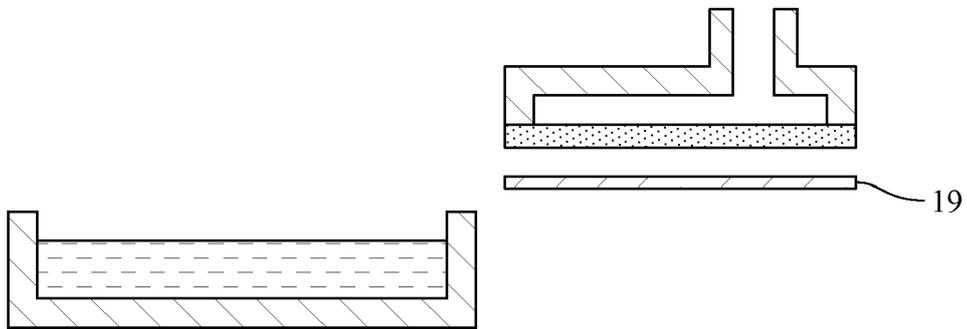


Fig. 3D

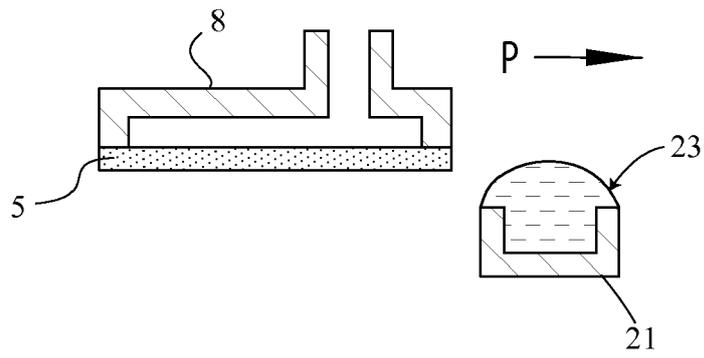


Fig. 4A

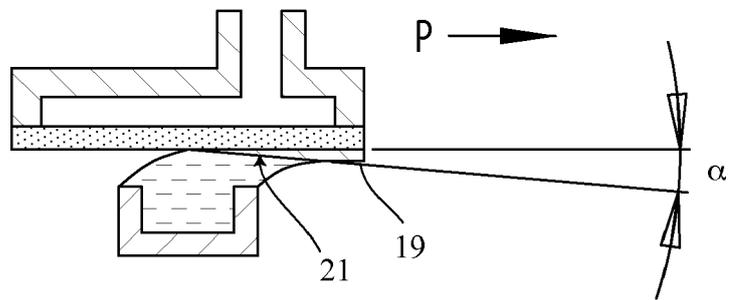


Fig. 4B

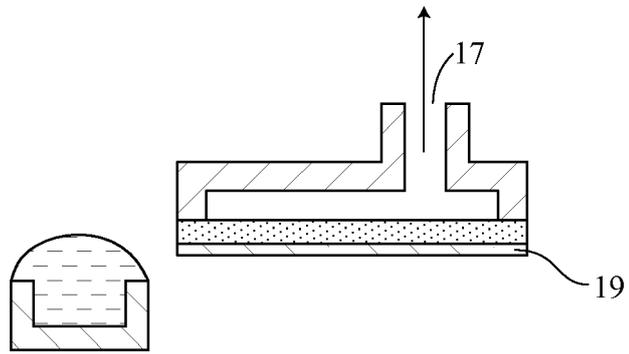


Fig. 4C

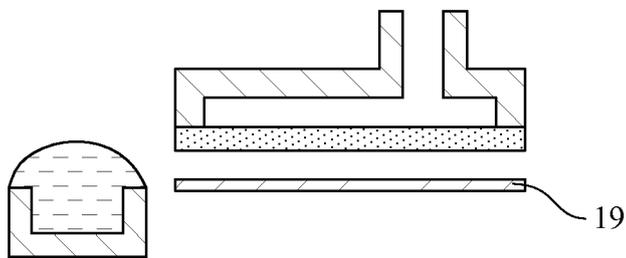


Fig. 4D

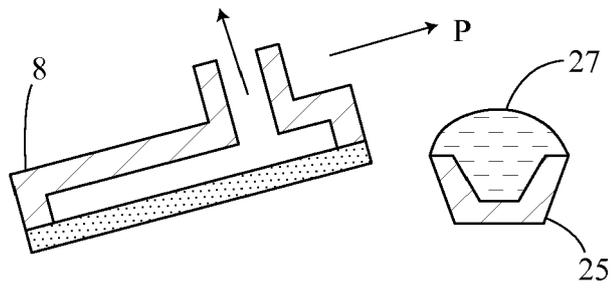


Fig. 5A

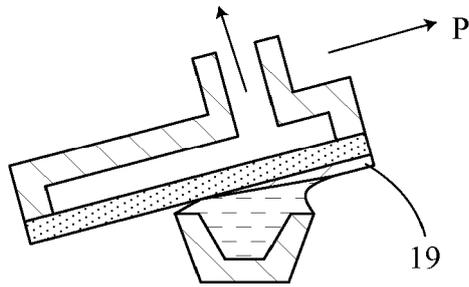


Fig. 5B

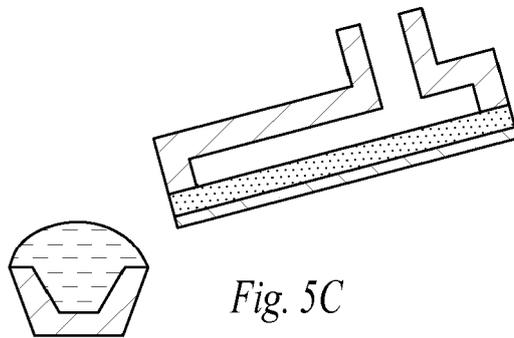


Fig. 5C

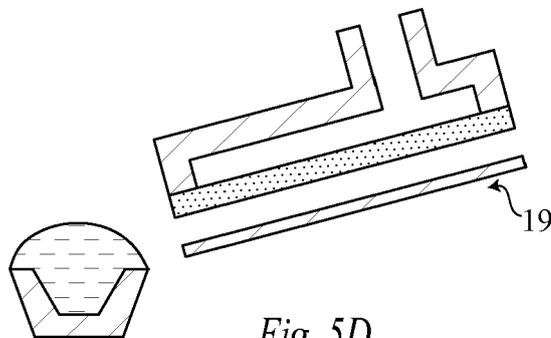


Fig. 5D

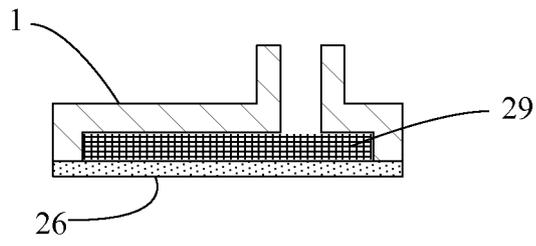


Fig. 6

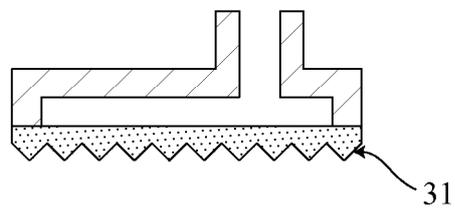


Fig. 7A

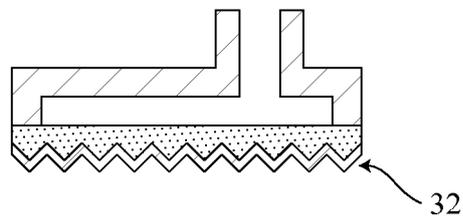


Fig. 7B

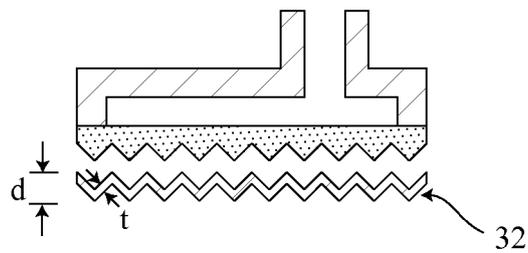


Fig. 7C

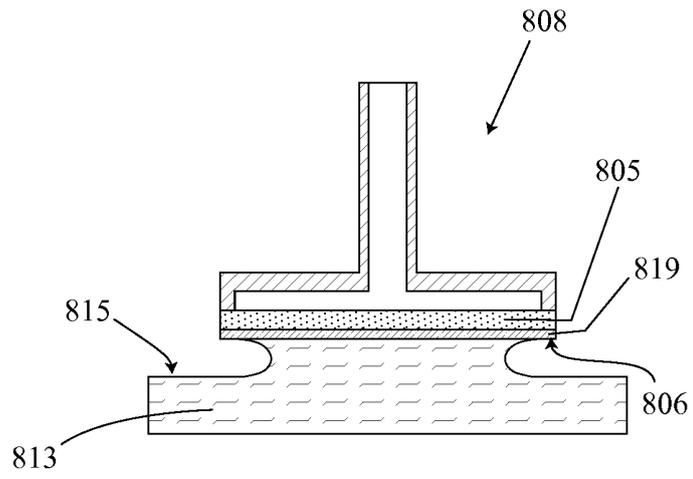


Fig. 8A

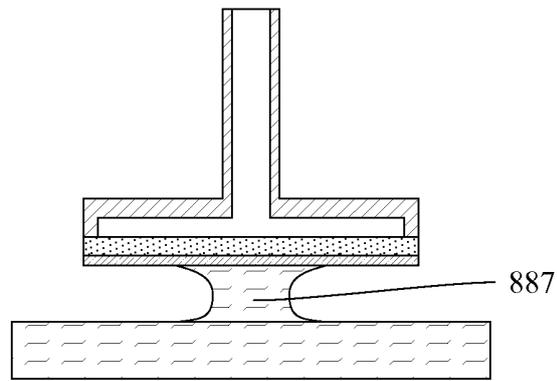


Fig. 8B

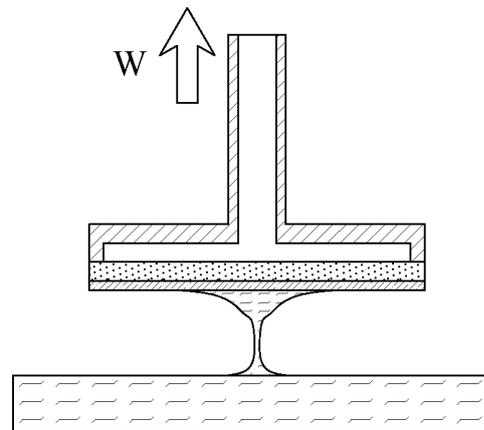


Fig. 8C

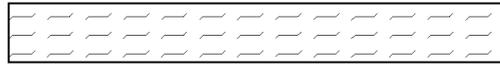
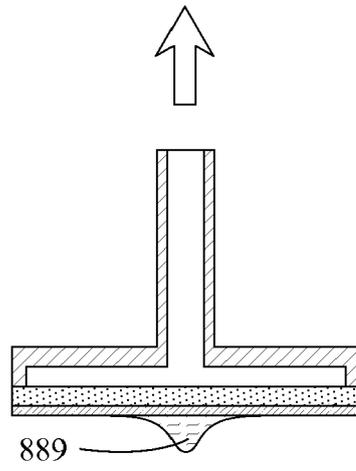


Fig. 8D

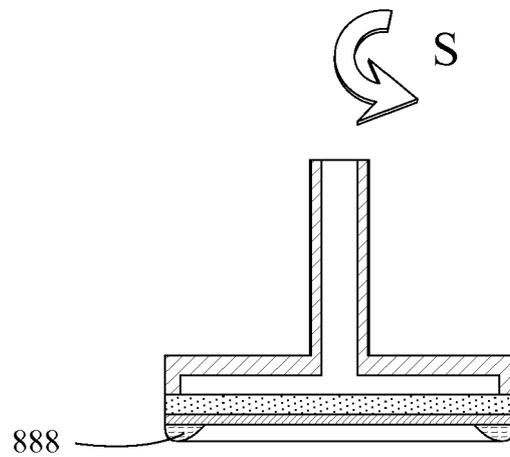


Fig. 8E

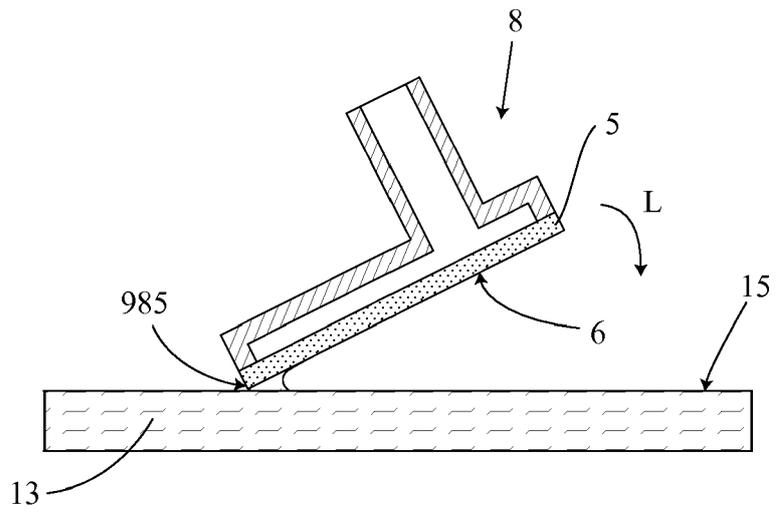


Fig. 9A

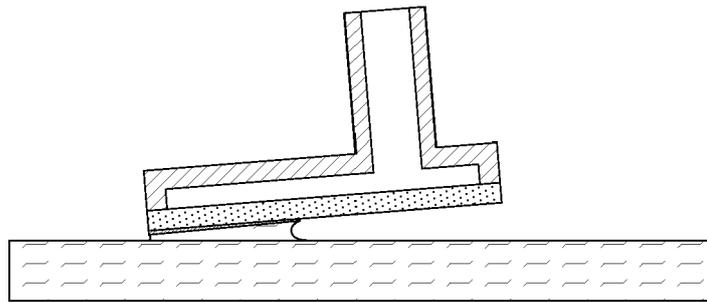


Fig. 9B

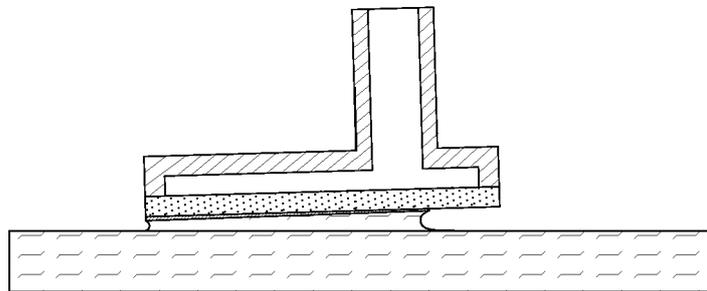


Fig. 9C

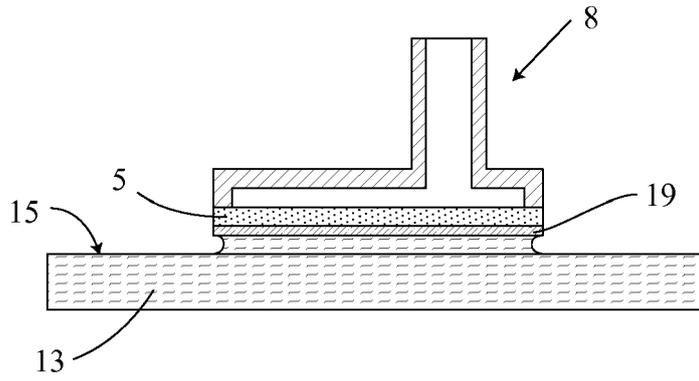


Fig. 10A

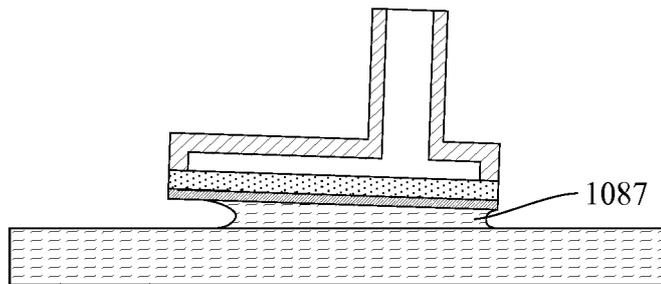


Fig. 10B

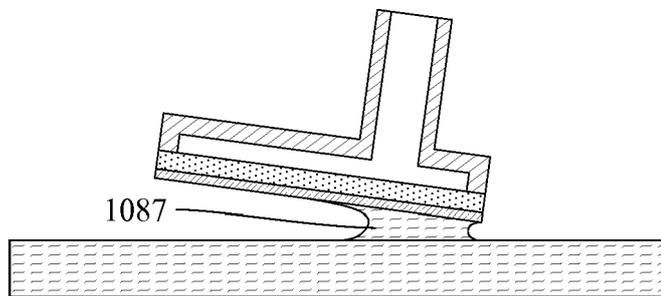


Fig. 10C

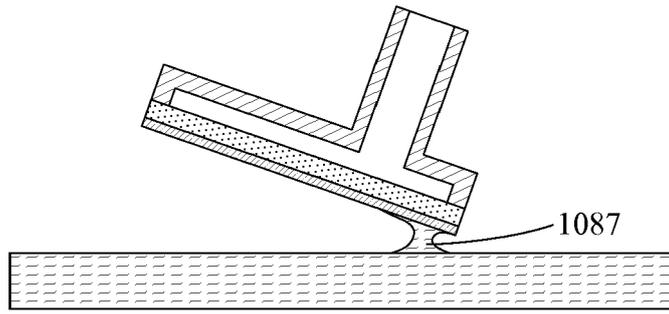


Fig. 10D

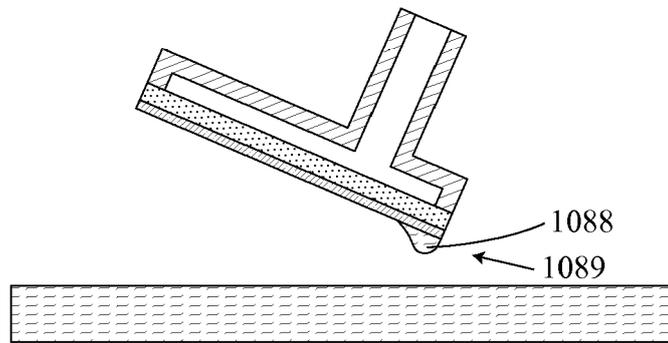


Fig. 10E

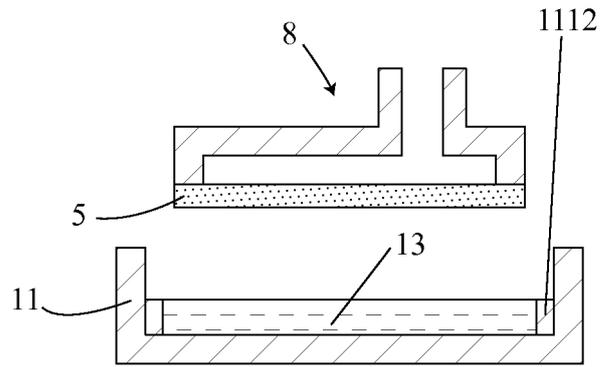


Fig. 11

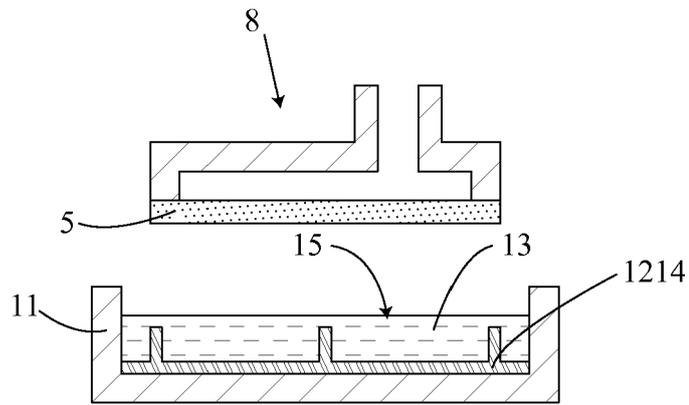


Fig. 12

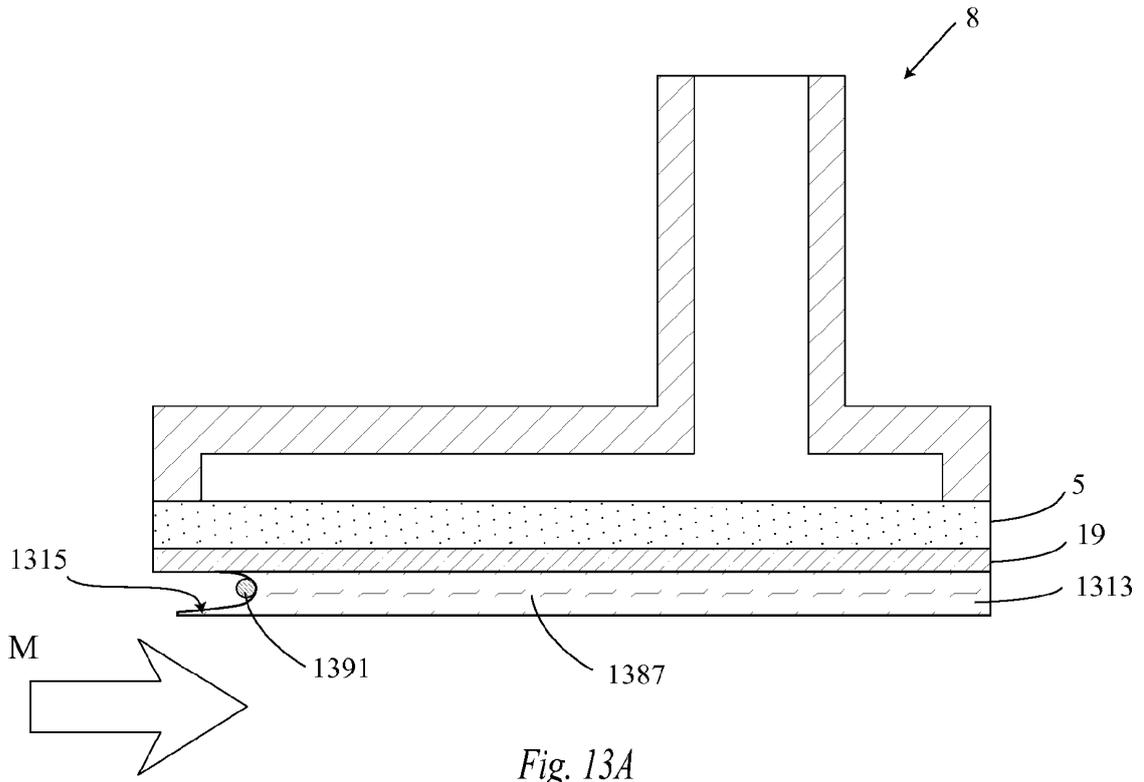


Fig. 13A

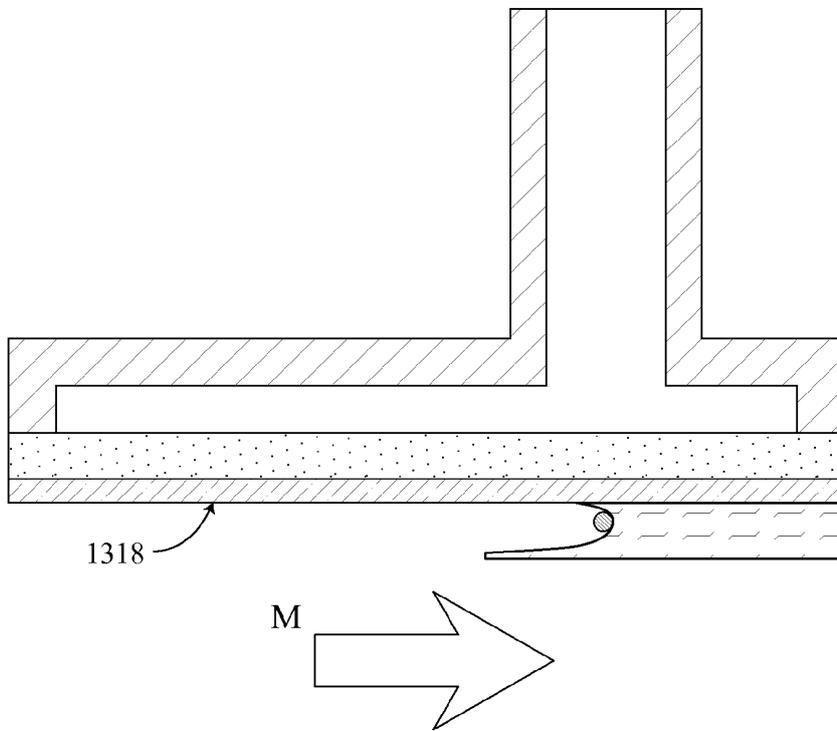


Fig. 13B

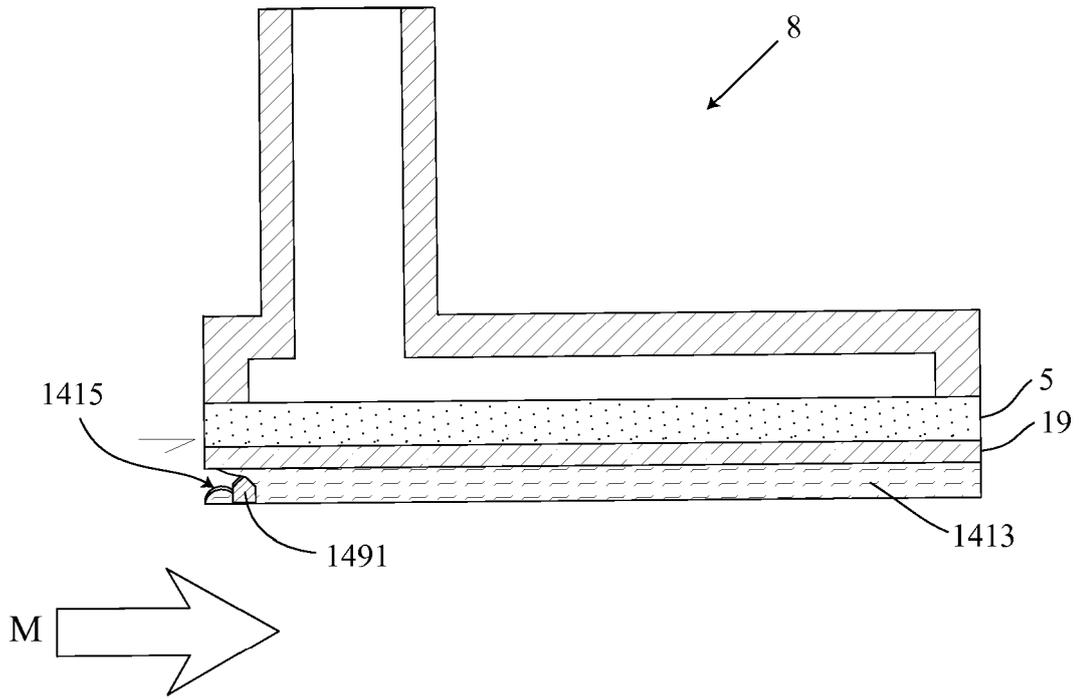


Fig. 14A

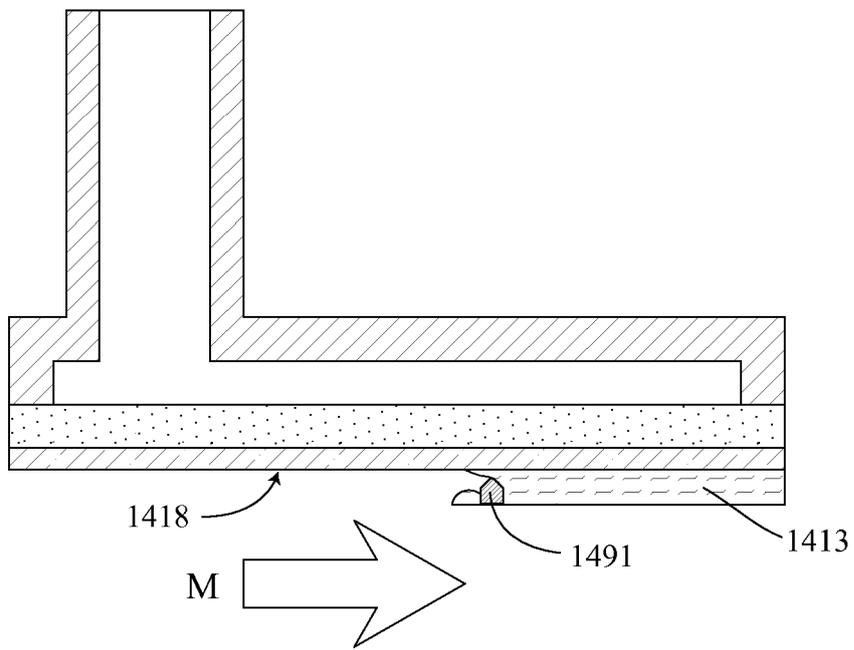


Fig. 14B

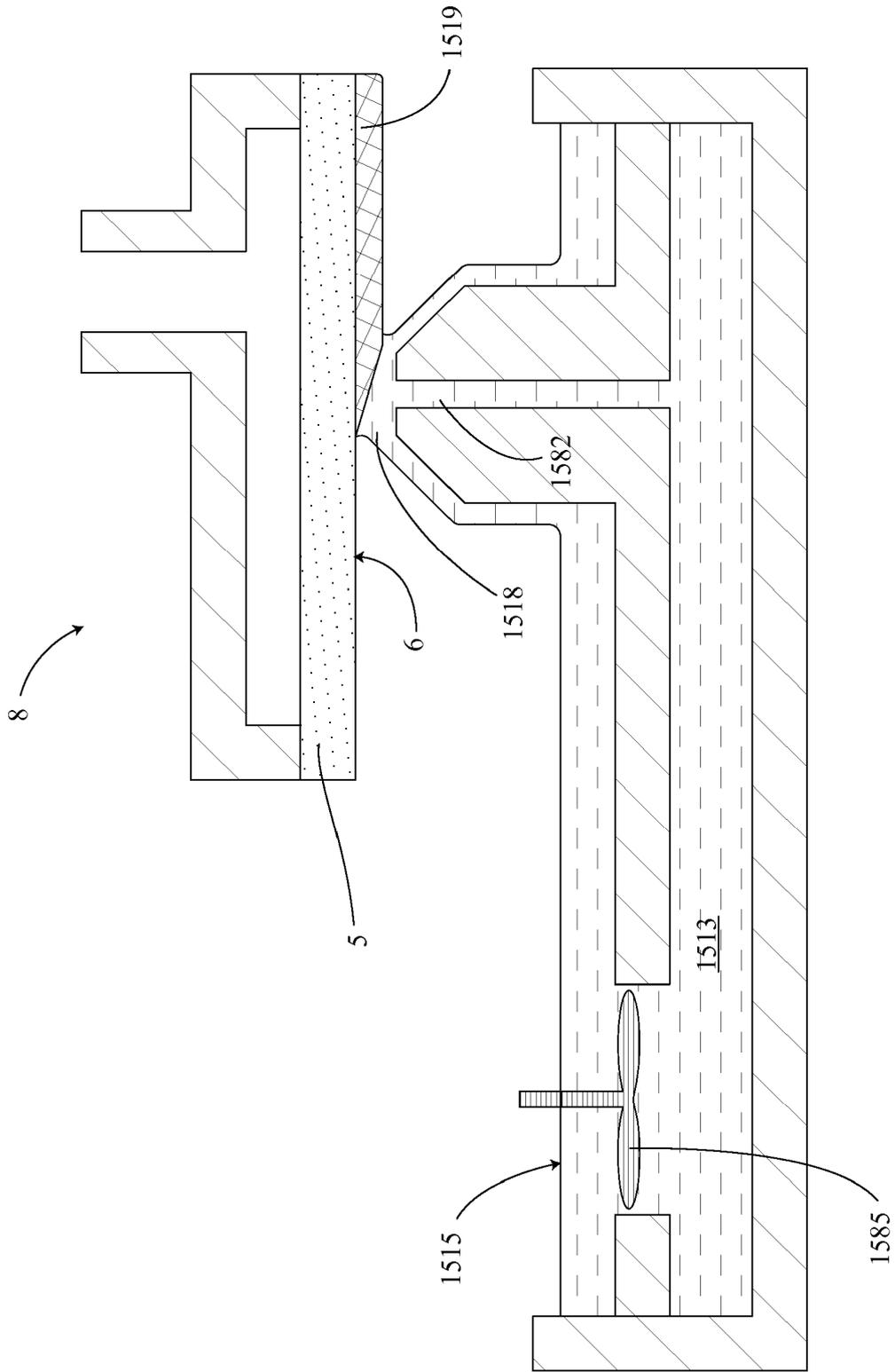


Fig. 15

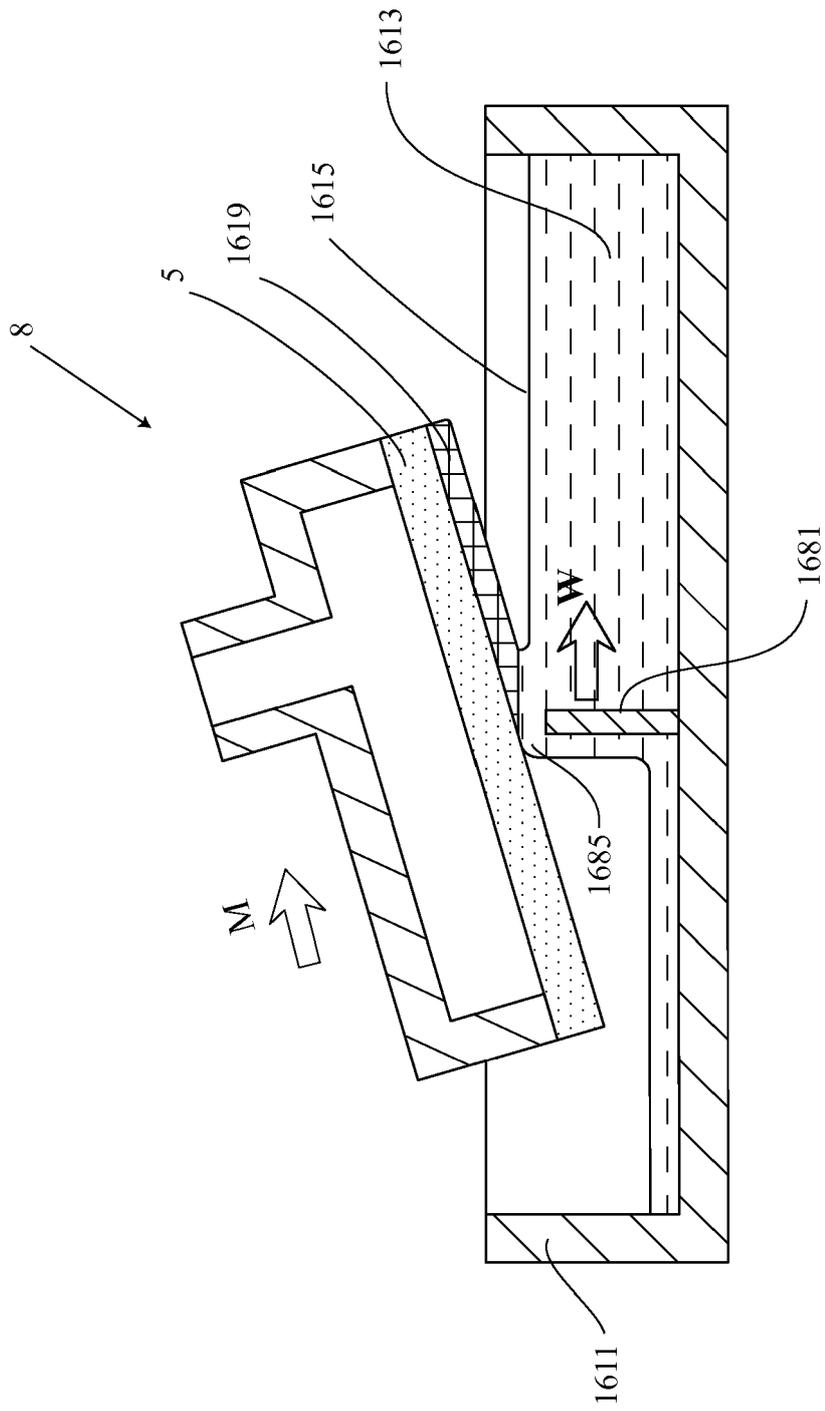
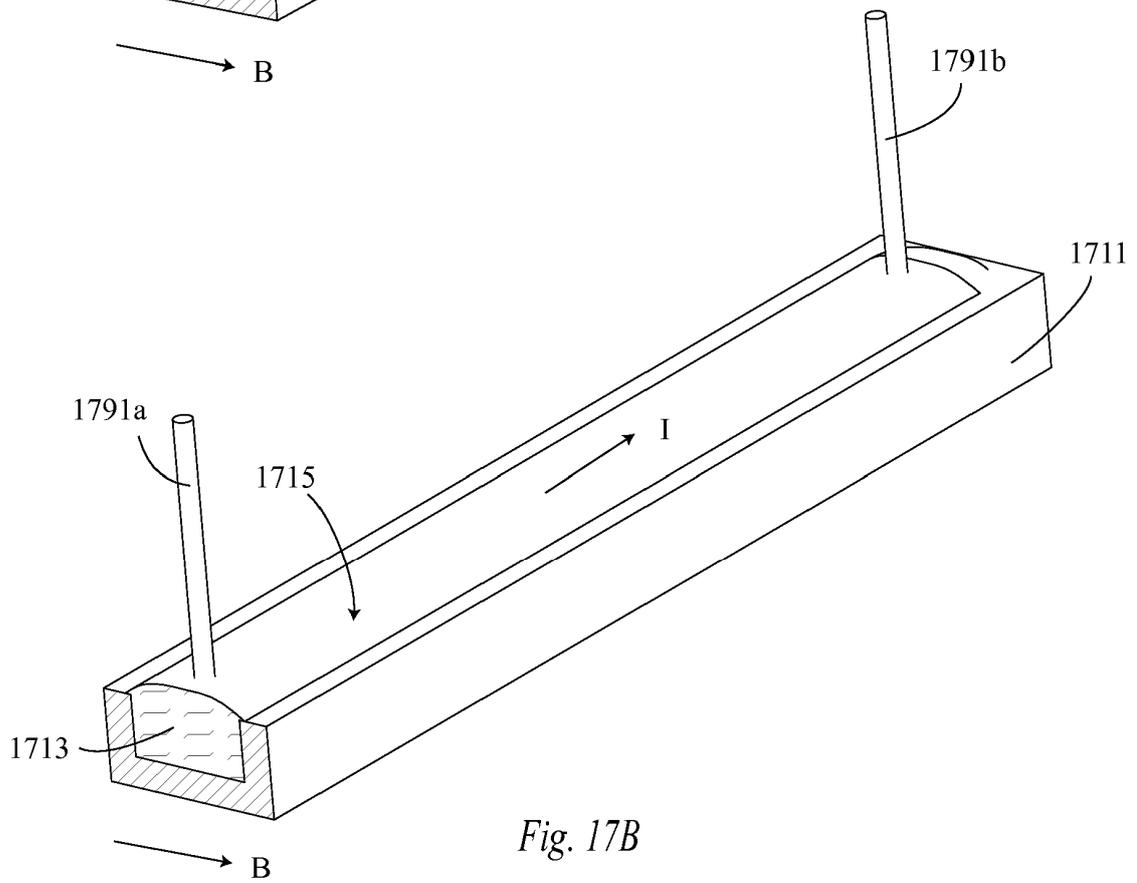
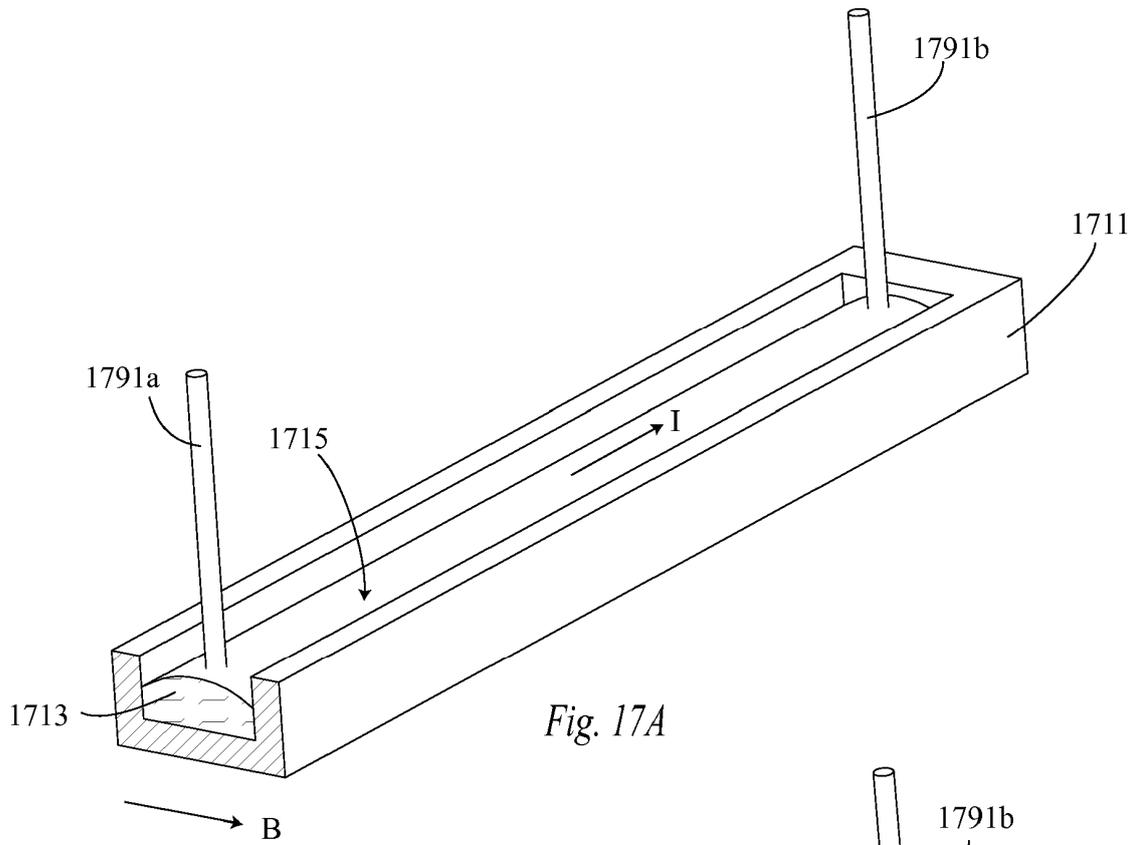


Fig. 16



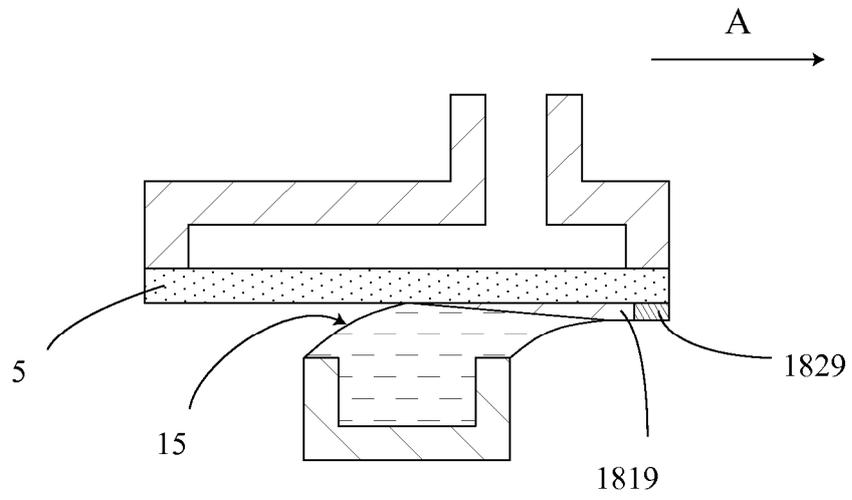


Fig. 18

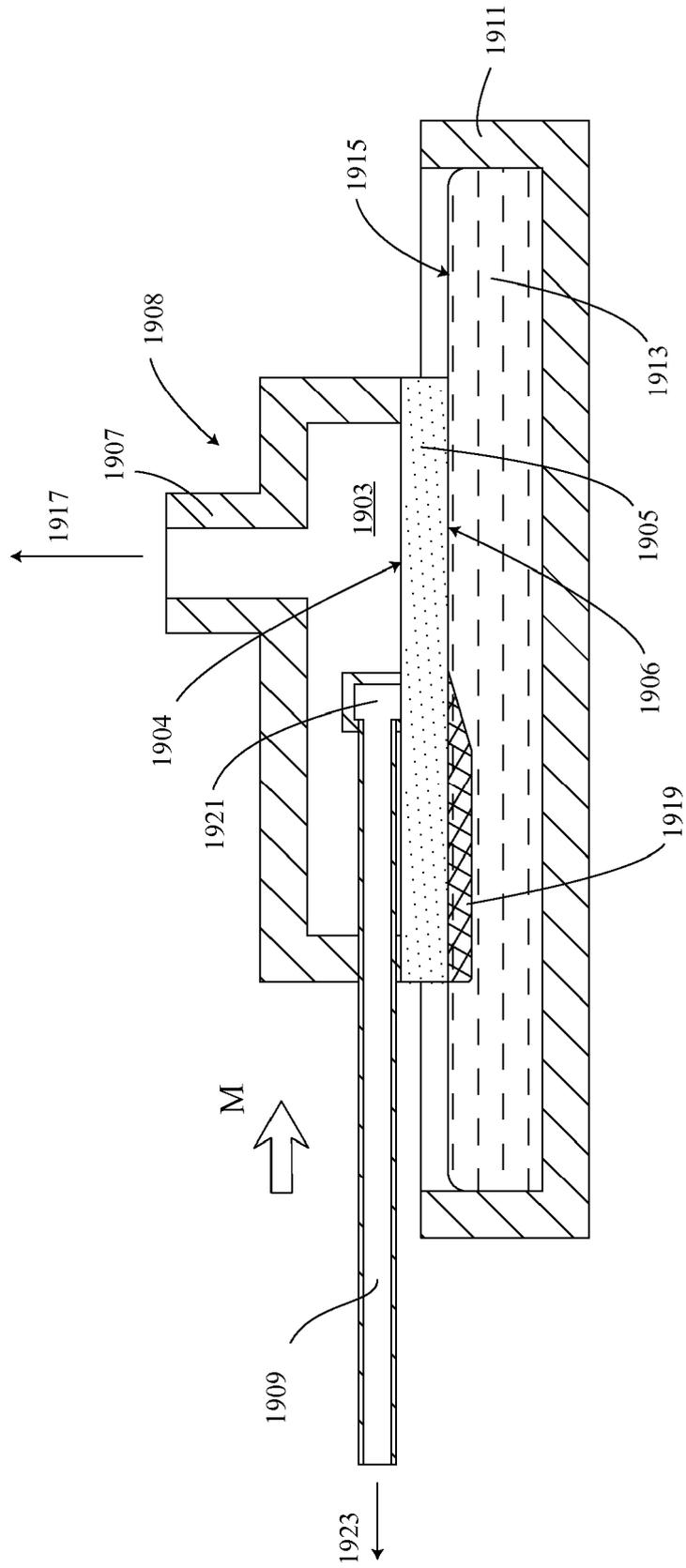


Fig. 19

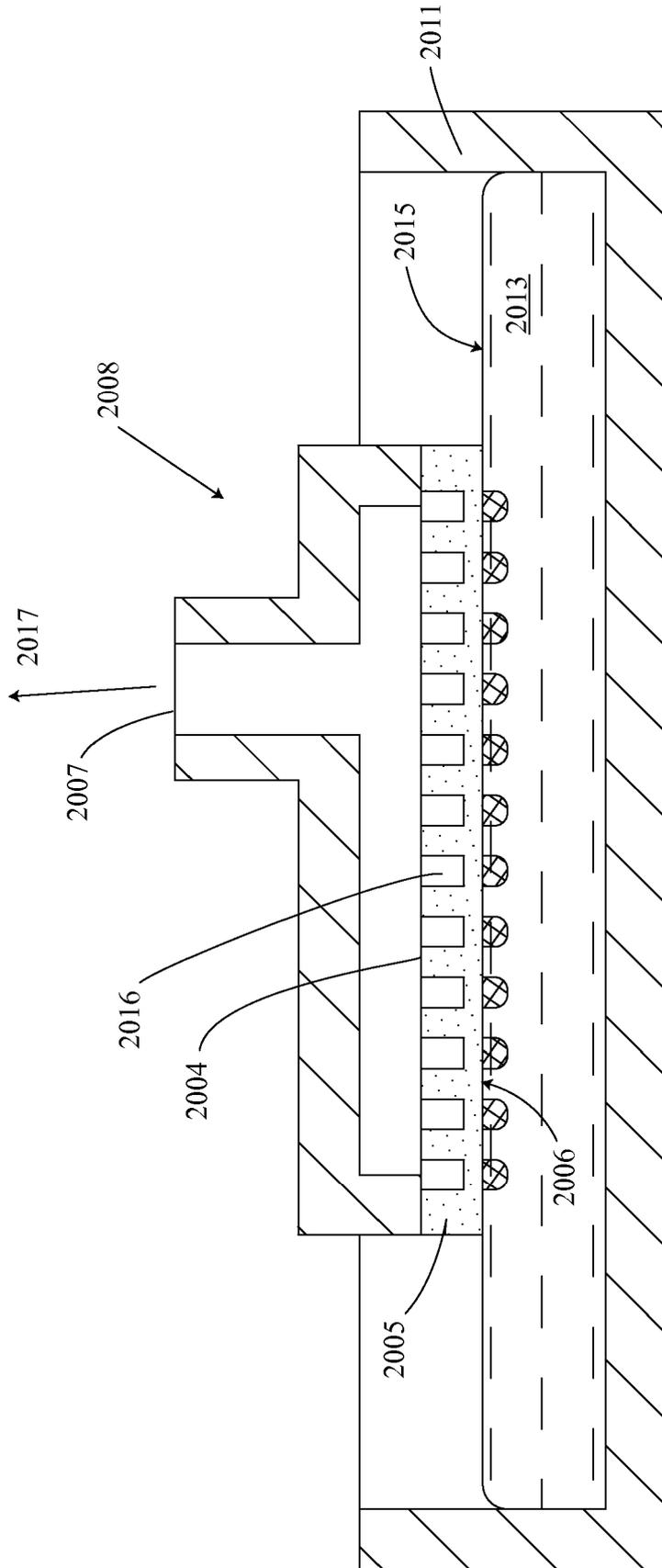


Fig. 20

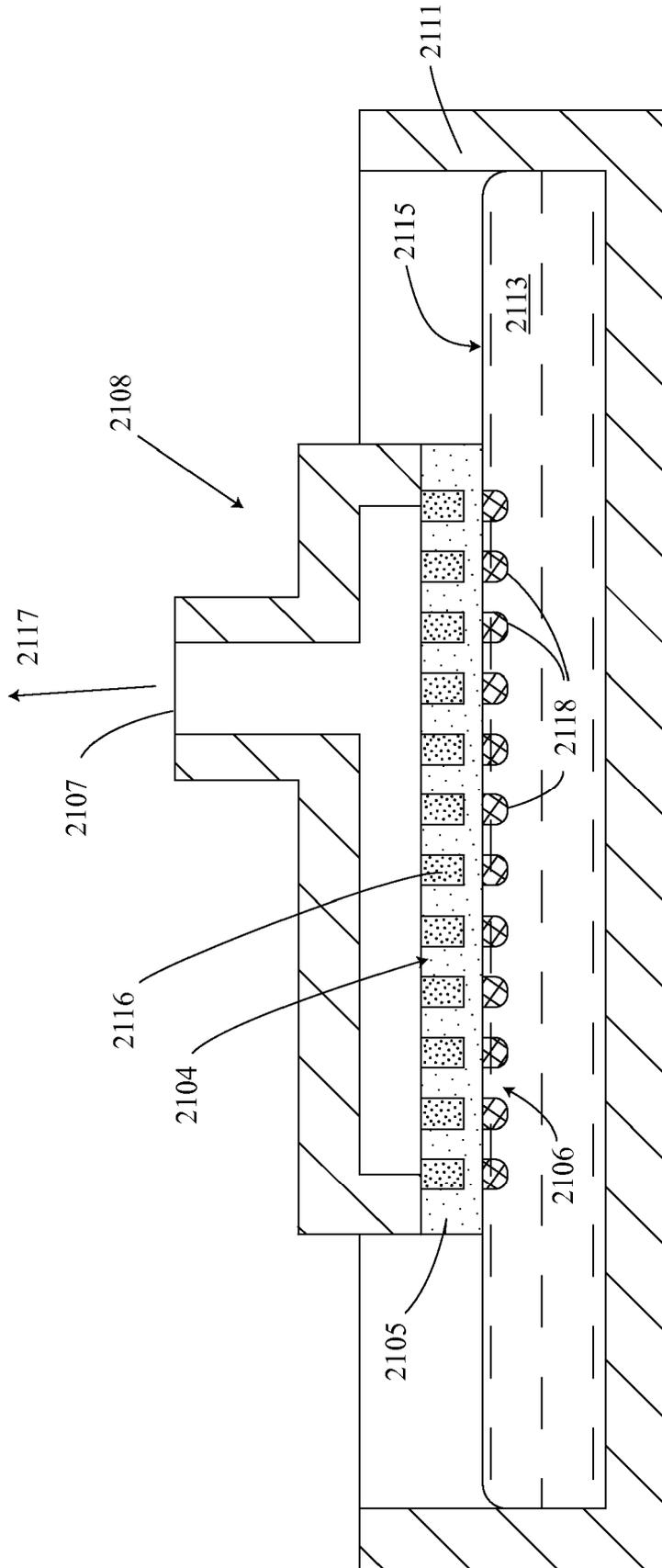


Fig. 21

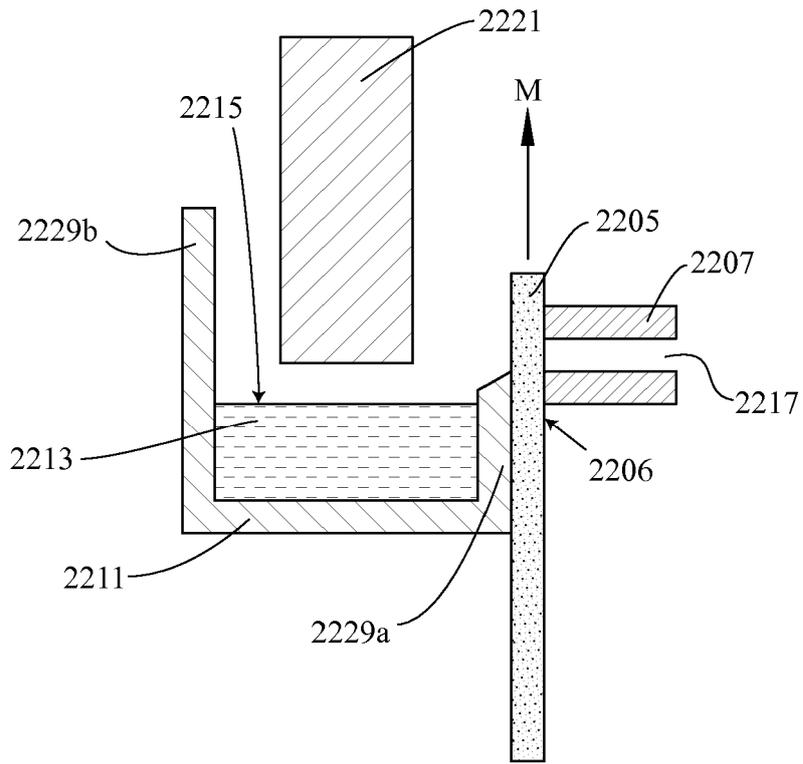


Fig. 22A

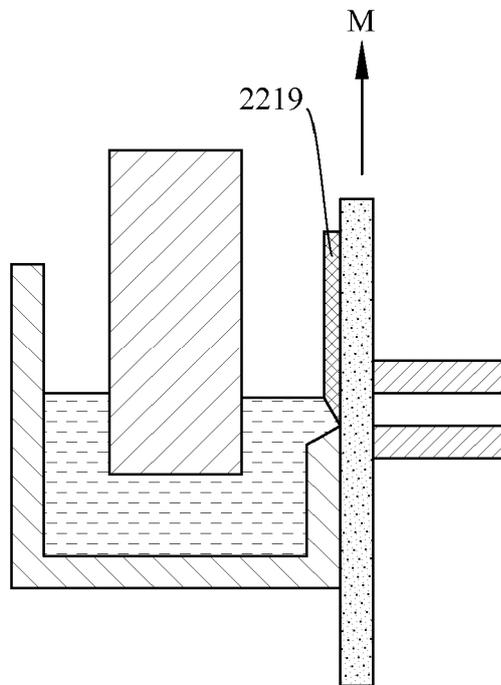


Fig. 22B

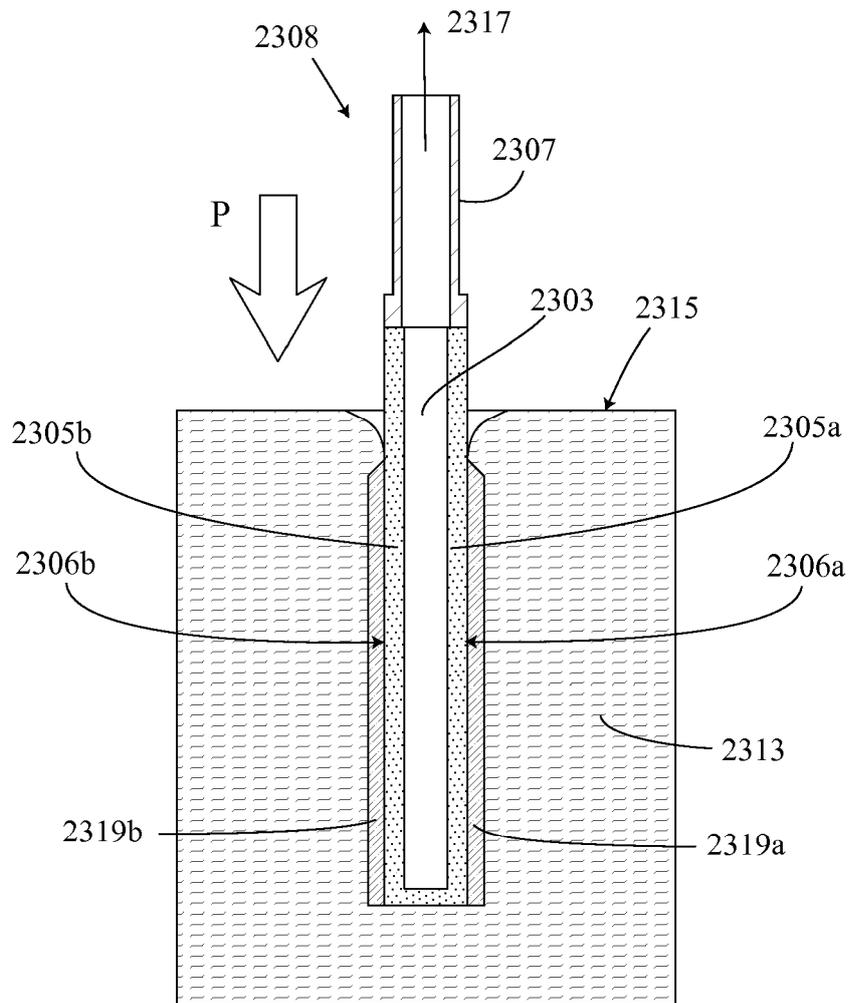


Fig. 23A

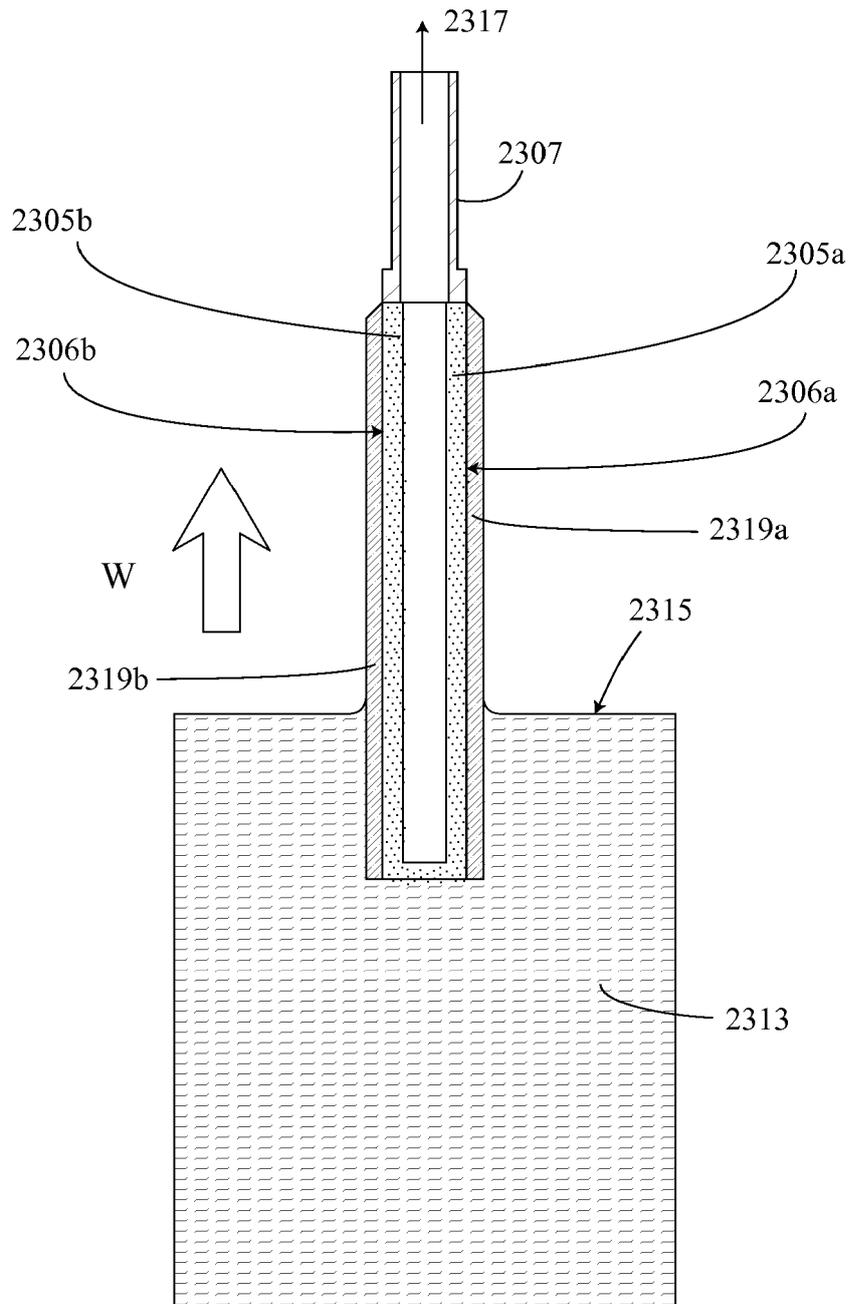


Fig. 23B

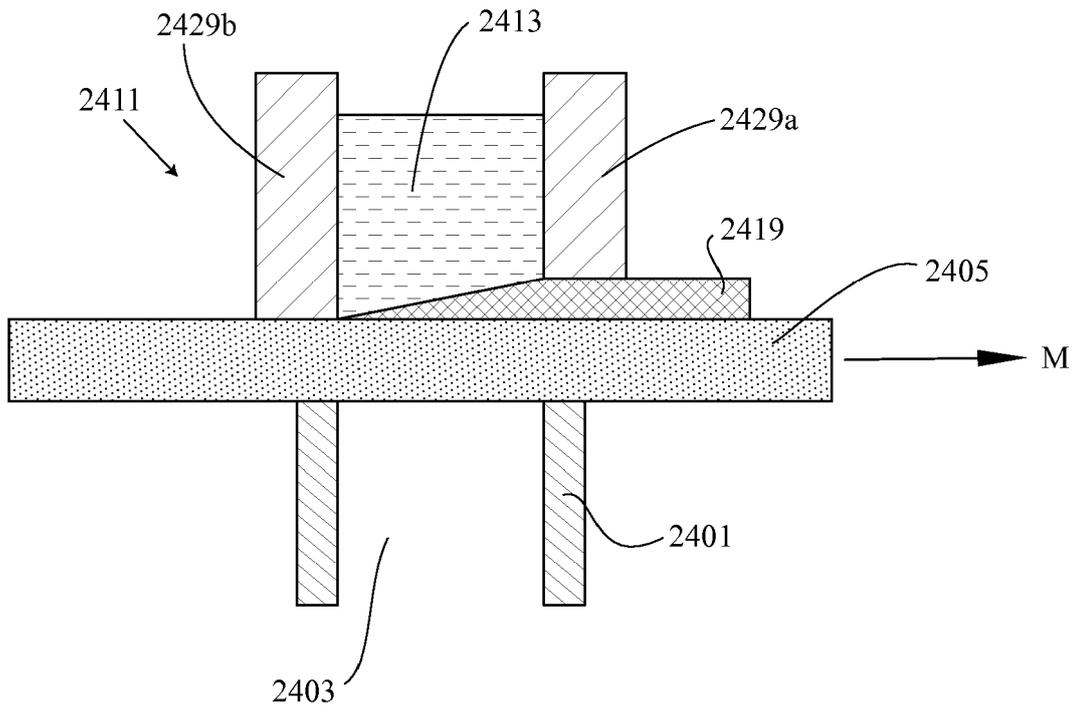


Fig. 24

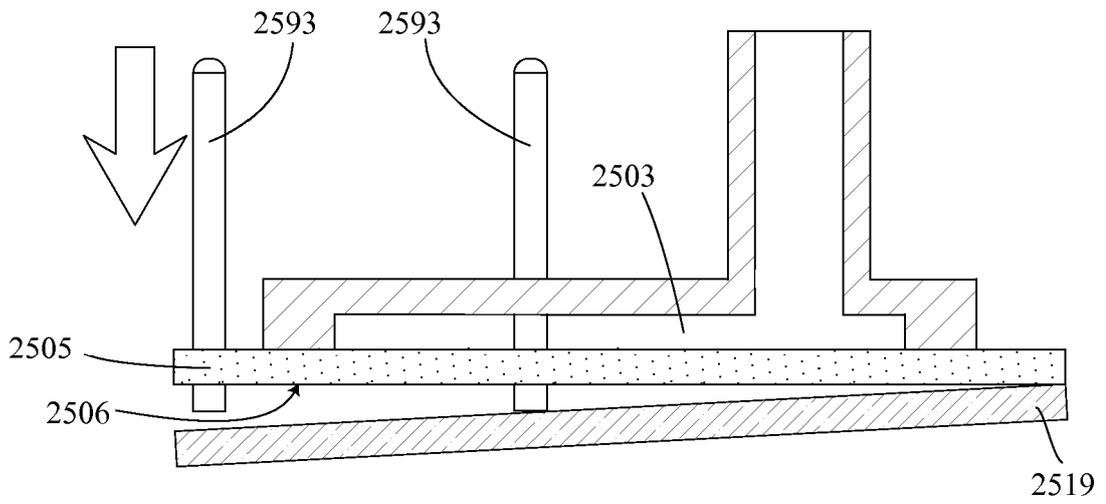


Fig. 25

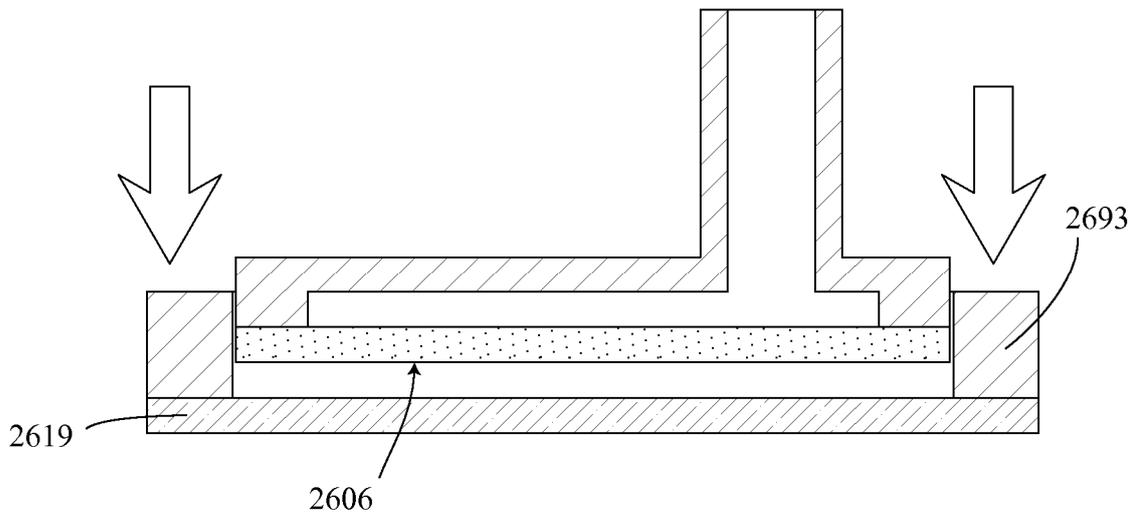


Fig. 26

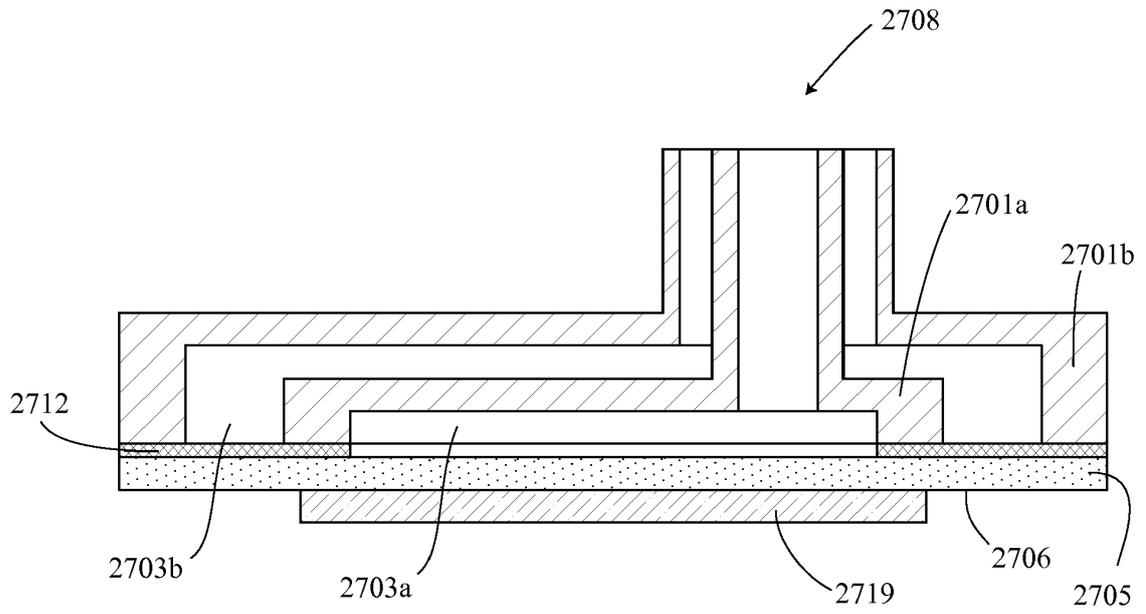


Fig. 27

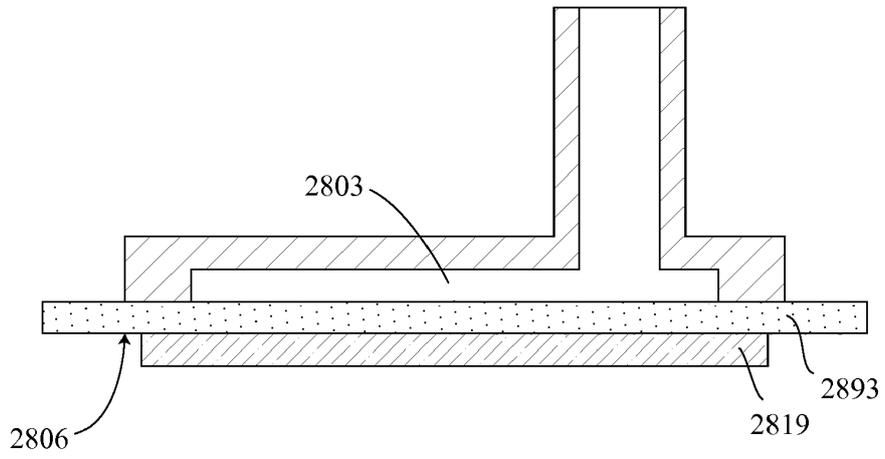


Fig. 28

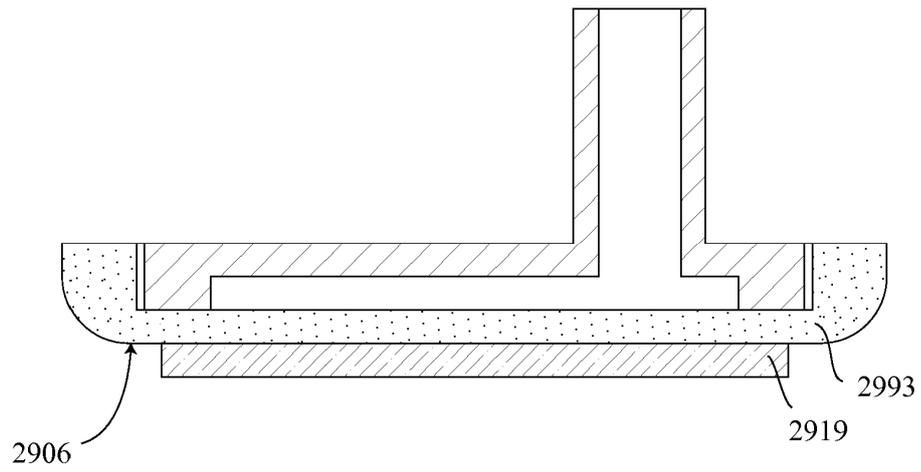


Fig. 29

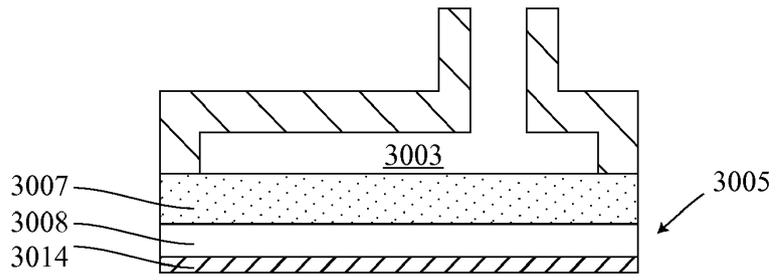


Fig. 30

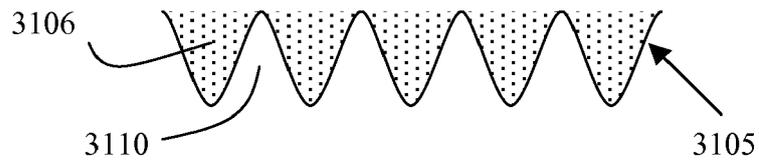


Fig. 31A

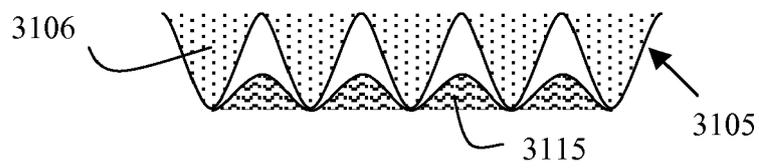


Fig. 31B

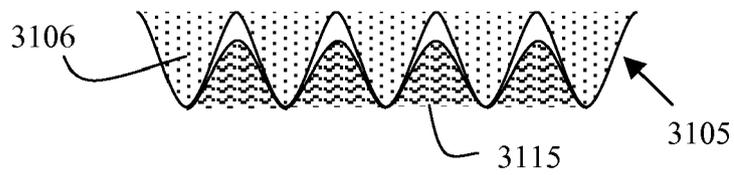


Fig. 31C

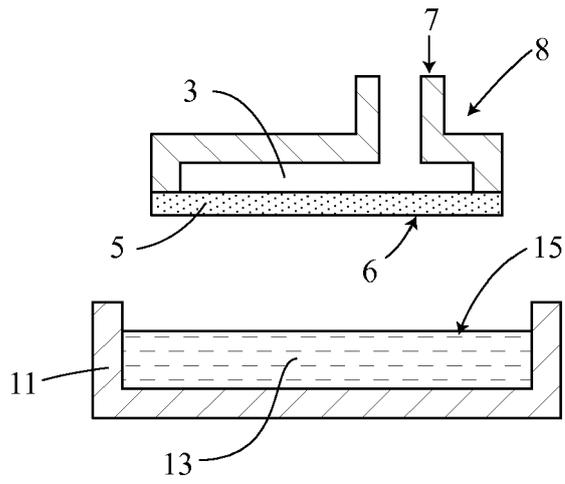


Fig. 32A

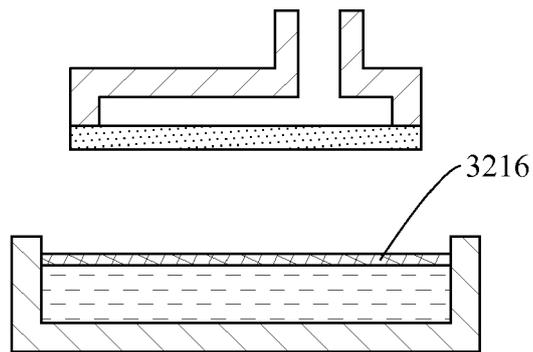


Fig. 32B

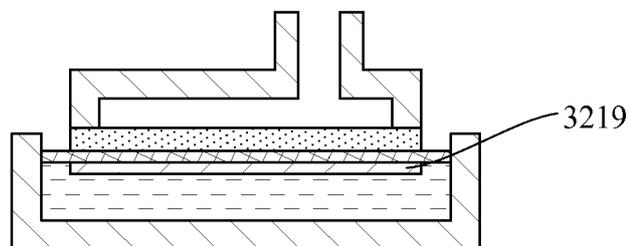


Fig. 32C

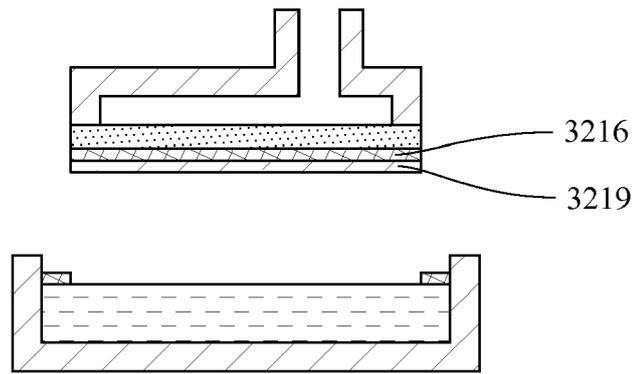


Fig. 32D

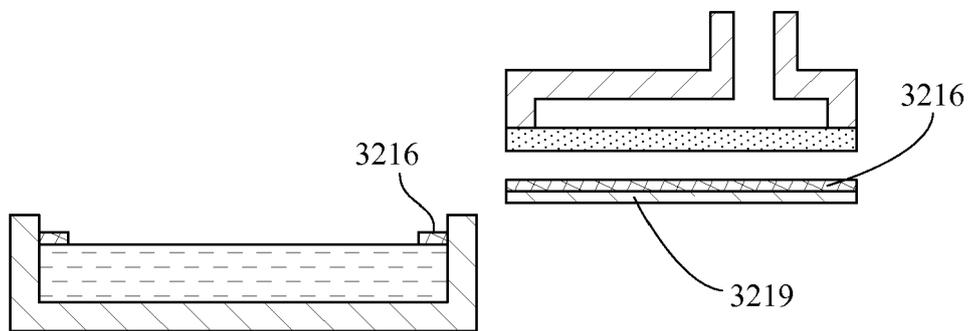


Fig. 32E

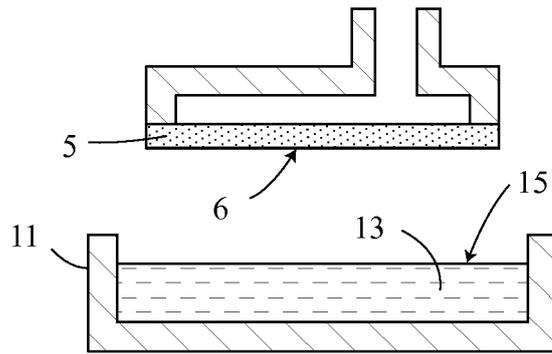


Fig. 33A

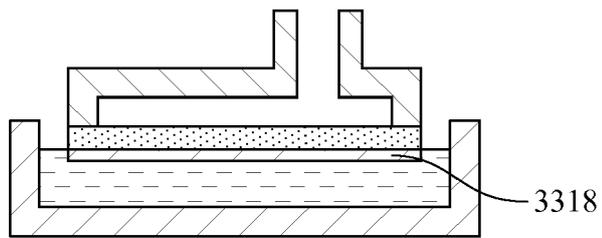


Fig. 33B

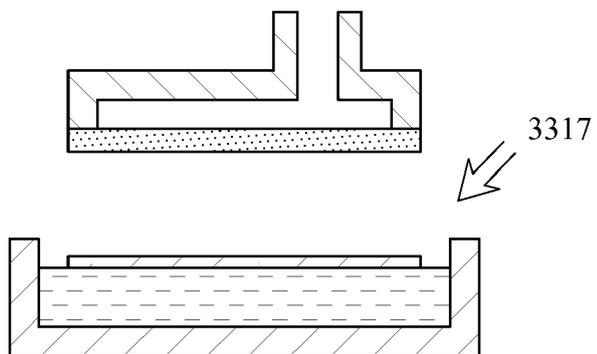


Fig. 33C

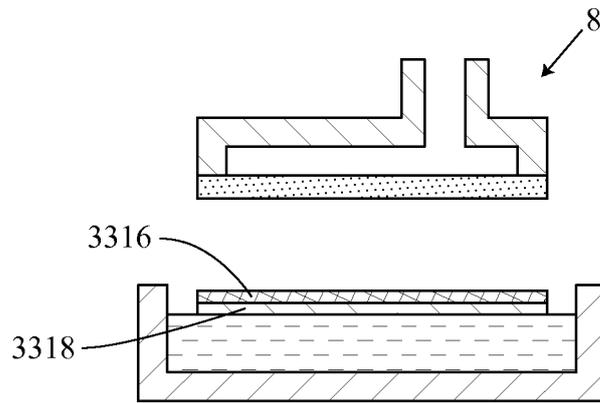


Fig. 33D

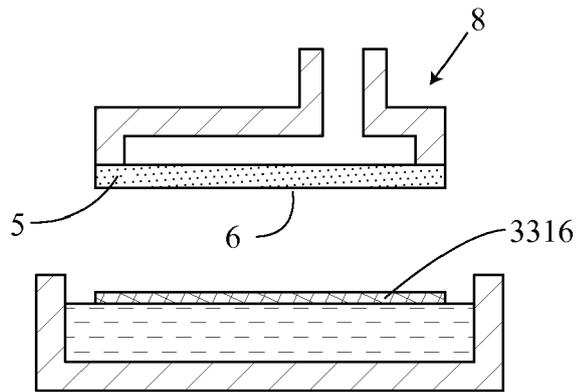


Fig. 33E

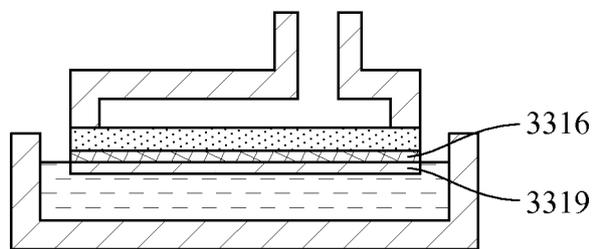


Fig. 33F

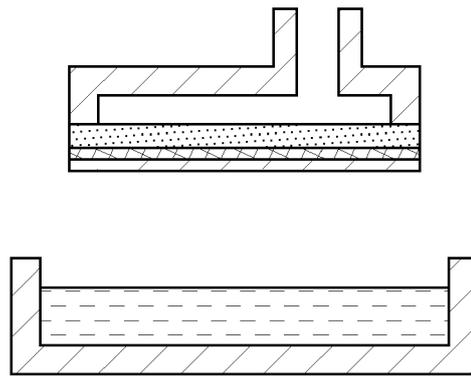


Fig. 33G

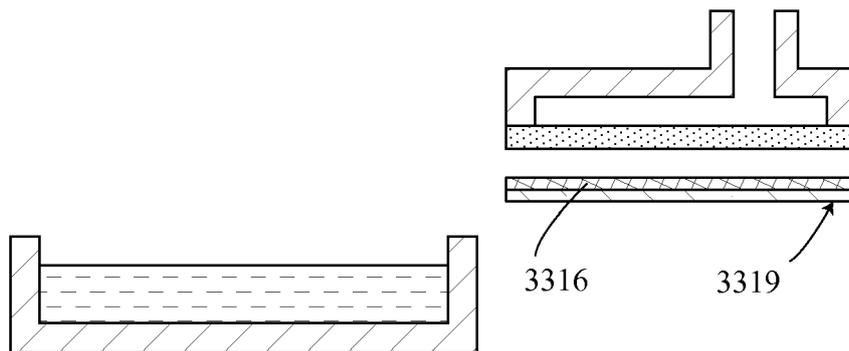


Fig. 33H

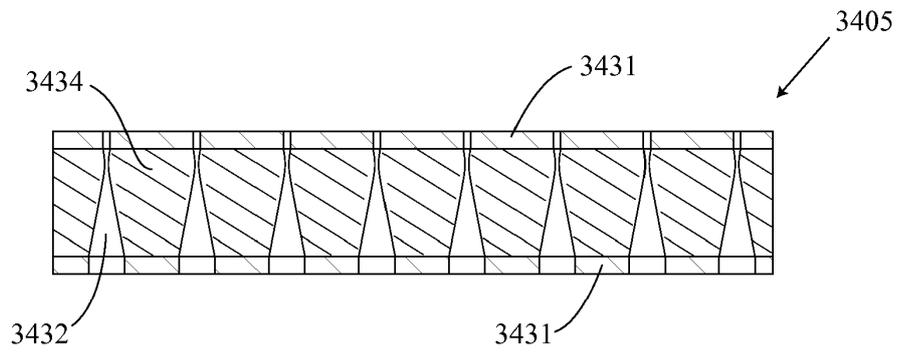


Fig. 34

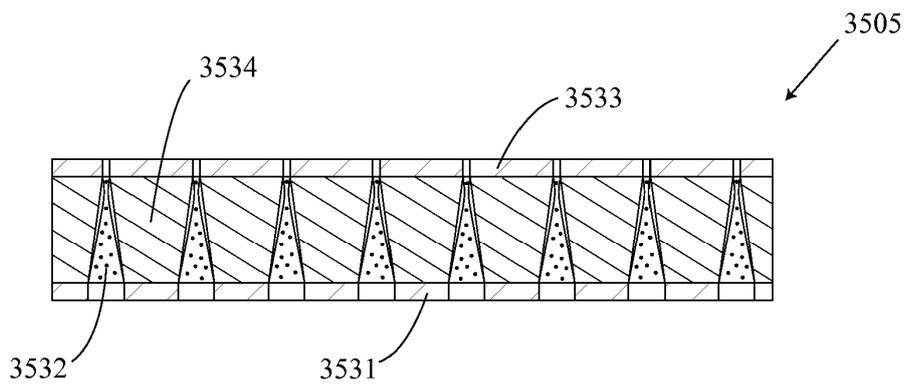


Fig. 35

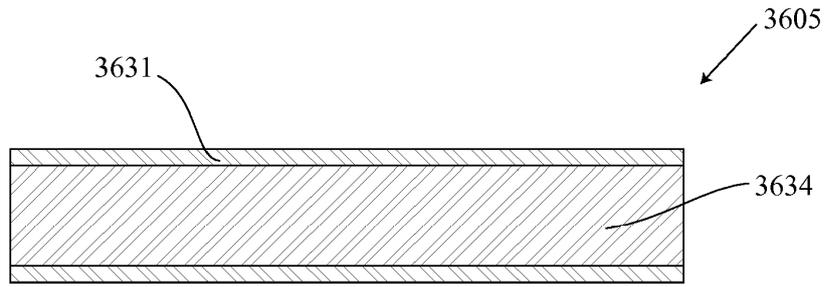


Fig. 36

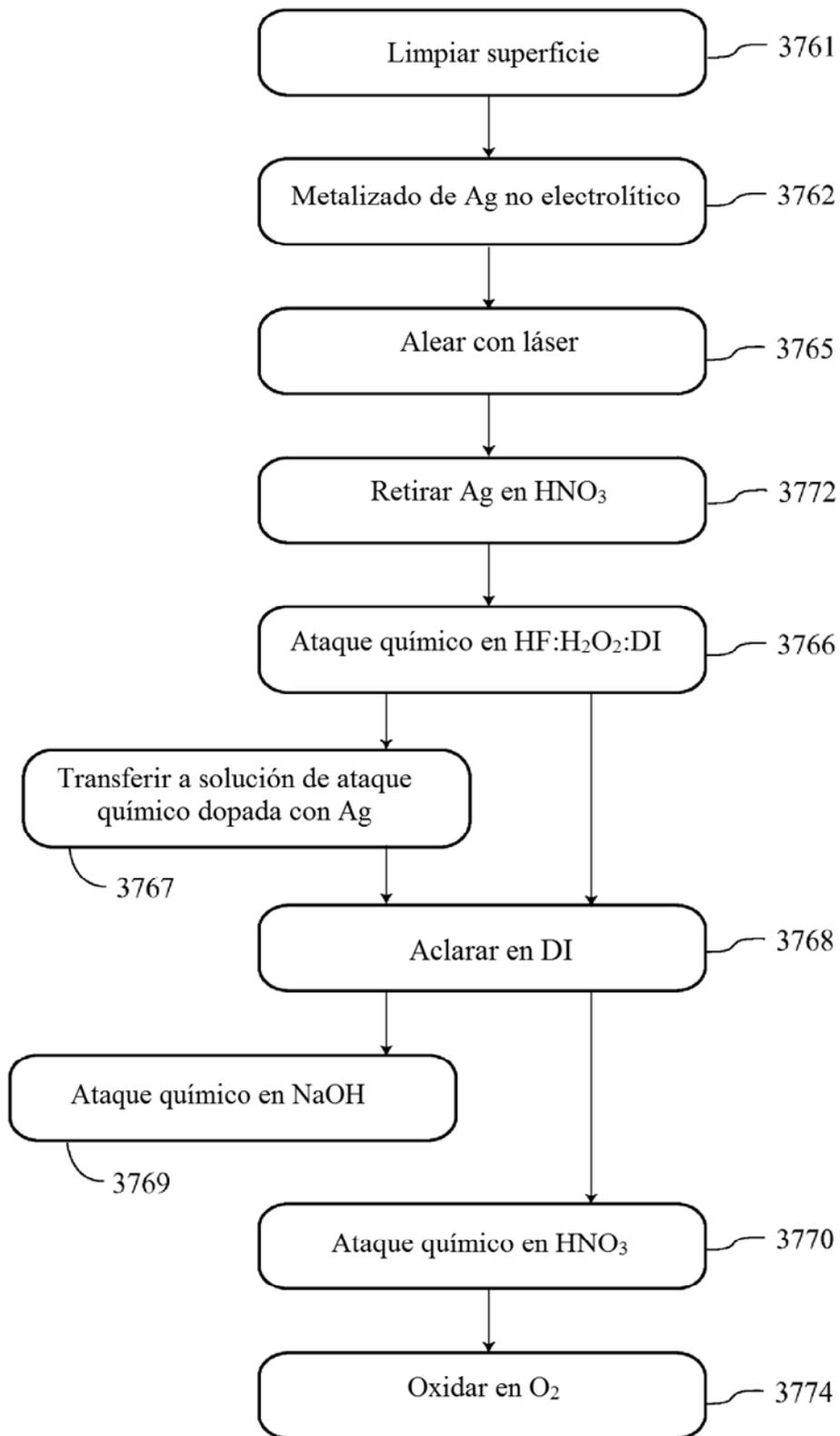


Fig. 37

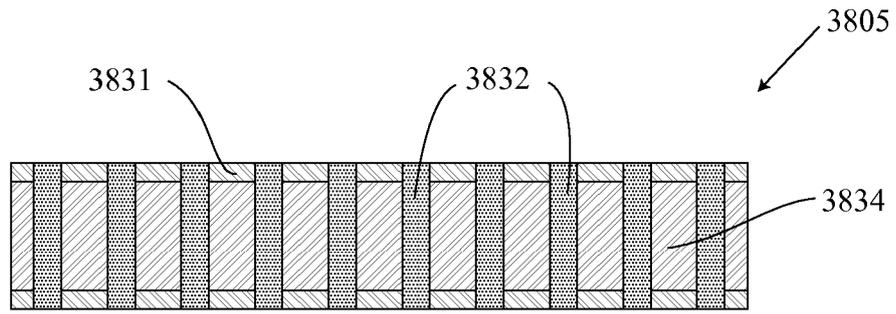


Fig. 38