

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 383 928**

51 Int. Cl.:
C30B 29/06 (2006.01)
C30B 11/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **08796655 .2**
96 Fecha de presentación: **25.07.2008**
97 Número de publicación de la solicitud: **2179078**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **28.04.2010**

54 Título: **Procedimiento y sistema para formar un lingote de silicio usando una materia prima de silicio de bajo grado**

30 Prioridad:
26.07.2007 US 828734

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
27.06.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
27.06.2012

73 Titular/es:
Calisolar, Inc.
985 Almanor Avenue
Sunnyvale, CA 94085, US

72 Inventor/es:
KIRSCHT, Fritz;
HEUER, Matthias;
ABROSIMOVA, Vera;
LINKE, Dieter;
RAKOTONIAINA, Jean Patrice y
OUNADJELA, Kamel

74 Agente/Representante:
Temño Cenicerros, Ignacio

ES 2 383 928 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Procedimiento y sistema para formar un lingote de silicio usando una materia prima de silicio de bajo grado.

5 CAMPO

La presente descripción se refiere a procedimientos y sistemas para su uso en la fabricación de materiales semiconductores, tales como el silicio. Más particularmente, la presente descripción se refiere a un procedimiento y un sistema para la formación de un lingote de semiconductor de pureza superior usando una materia prima de semiconductor de baja pureza.

DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA RELACIONADA

15 La industria de la industria fotovoltaica (FV) está creciendo rápidamente y es responsable de que se consuma una creciente cantidad de silicio más allá de los usos más tradicionales, como aplicaciones de circuitos integrados (CI). A día de hoy, las necesidades de silicio de la industria de las celdas solares están comenzando a competir con las necesidades de silicio de la industria de CI. Con las tecnologías de fabricación actuales, tanto la industria de los circuitos integrados (CI) como las industrias de las celdas solares requieren una materia prima de silicio refinada y purificada como material de partida.

20 Las alternativas de materiales para celdas solares varían de silicio monocristalino de grado electrónico (GE) a silicio relativamente sucio de grado metalúrgico (GM). El silicio de GE produce celdas solares que tienen eficacias cercanas al límite teórico (pero a un precio prohibitivo), mientras que el silicio de GM típicamente no puede producir celdas solares funcionales. Las anteriores celdas solares hechas de silicio policristalino lograron eficiencias relativamente bajas cercanas al 6%. La eficiencia es una medida de la fracción de la energía incidente sobre la celda con respecto a la recogida y convertida en corriente eléctrica. Sin embargo, puede haber otros materiales semiconductores que pueden ser útiles para la fabricación de celdas solares.

30 Las celdas disponibles en el mercado hoy en día con eficiencias del 24% son posibles por materiales de pureza superior y técnicas de procesamiento mejoradas. Estos avances de la ingeniería han ayudado a la industria a aproximarse al límite teórico para obtener eficiencias de las celdas solares de silicio de unión simple del 31%. En la práctica, casi el 90% de las celdas solares comerciales están hechas de silicio cristalino.

35 Varios factores determinan la calidad de la materia prima de silicio que puede ser útil para la fabricación de celdas solares. Estos factores pueden incluir, por ejemplo, el metal de transición y el contenido y la distribución dopante. Los metales de transición plantean un desafío principal para la eficiencia de las celdas solares de silicio multicristalino. Las celdas solares de silicio multicristalino pueden tolerar metales de transición, tales como hierro (Fe), cobre (Cu) o níquel (Ni) en concentraciones de hasta 10^{16} cm^{-3} , ya que a menudo se encuentran metales en el silicio multicristalino en inclusiones o precipitados menos eléctricamente activos, a menudo situados en defectos estructurales (por ejemplo, bordes de grano) en lugar de disolverse atómicamente.

45 Los materiales de materias primas de bajo grado para la industria FV, tales como silicio metalúrgico mejorado (UMG), se procesan típicamente en lingotes y obleas de Si multicristalino (mc) con correspondientemente baja calidad. Esta baja calidad se controla por una alta concentración de impurezas que degradan finalmente las características de las celdas solares. La degradación puede ser particularmente grave si las impurezas interactúan con los defectos estructurales característicos del mc-Si. En este sentido, uno de los defectos más nocivos son las dislocaciones intra-granulares que se introducen principalmente en el alivio de la tensión descontrolada en la fase de refrigeración de la cristalización.

50 Las impurezas no metálicas, incluyendo carbono (C) y dopantes (en su mayoría B y P) se extraen usando una diversidad de tecnologías de limpieza, tales como gases reactivos de soplado a través de Si fundido. Se describen otras técnicas para retirar impurezas en los documentos US 3.012.865 A, EP 0 867 405 A1, US 2005/139148 A1, EP 1 154 047 A1 y US 2006/048698 A1. Los documentos US 3.012.865 A y EP 1 154 047 A1 usan succión para elevar el silicio fundido por un tubo de aspiración. El documento US 2006/048698 A1 usa un dispositivo de volcado para verter el material contaminado. Típicamente, se aplica una combinación de varias etapas/tecnologías de limpieza para alcanzar un nivel de calidad aceptable de mc-Si después de la cristalización. Ya que se añaden costes con la adición de etapas de limpieza existe el deseo de usar un material de tan baja calidad como sea posible. Como resultado, hay materiales de materias primas que a menudo contienen cantidades muy altas de C y/o P. Si la concentración de C excede la solubilidad en la cristalización, los precipitados de carburo de silicio (SiC) se forman en cristales/lingotes respectivos y el SiC degrada en exceso los materiales de mc-Si respectivos.

65 Las impurezas metálicas se enriquecen en exceso hacia el final de la cristalización. Si la solidificación direccional comienza en el fondo de una fusión de Si, como en el caso de, por ejemplo, moldeo de Bridgman, el mc-Si solidificante se contamina gravemente en la parte superior de los lingotes respectivos. Ya que la mayor parte de los metales de degradación de calidad en el Si son difusores relativamente rápidos en Si cristalino, estos metales pueden difundirse parcialmente de nuevo en el Si solidificado durante la refrigeración de los lingotes, dando lugar a

una degradación adicional de las partes más profundas de los lingotes respectivos. Esto hace posible usar un descenso extendido para el recocido *in situ* de los lingotes, al menos en el intervalo de temperatura por encima de aprox. 1050 °C (en el que la difusión de los metales es especialmente rápida). Por otro lado, este intervalo de temperatura es potencialmente útil para el recocido *in situ* con el fin de mejorar la estructura cristalina y reducir la tensión latente en los lingotes de mc-Si.

Si el proceso continúa hasta la solidificación completa de la fusión de silicio, entonces las impurezas metálicas se difunden de vuelta al lingote de silicio. Sin la difusión, el lingote de silicio sería de una pureza superior. El resultado de dicha retrodifusión se traduce en una cantidad de silicio en el lingote que no es útil, pero que hubiera sido útil si se no hubiera producido la retrodifusión. Actualmente, ningún proceso conocido aborda adecuadamente este problema.

Por consiguiente, existe la necesidad de una fuente de lingotes de silicio que cumpla las necesidades de silicio de la industria de las celdas solares, cuya fuente no pueda competir con la demanda de la industria de los CI.

Existe la necesidad de proporcionar lingotes de silicio que puedan formar finalmente celdas solares disponibles en el mercado con eficiencias que pueden conseguirse actualmente usando caros materiales de pureza superior y/o costosas técnicas de procesamiento.

Existe la necesidad adicional de un proceso capaz de producir un lingote de silicio de calidad superior usando una materia prima de silicio de bajo grado que consigue una reducción general de los costes. Aún existe la necesidad de un procedimiento y un sistema que aborden tanto económica como eficazmente el problema de la retrodifusión de impurezas en las fases finales de la formación de lingotes de silicio.

RESUMEN

Aquí se describen técnicas para la formación de un lingote de silicio que puede ser útil para fabricar finalmente celdas solares. La presente descripción incluye un procedimiento y un sistema para, y un lingote de silicio resultante que incluye un material semiconductor de pureza superior usando una materia prima de semiconductor de pureza inferior. Por ejemplo, usando lingotes de silicio formados a partir de los procedimientos descritos aquí, son prácticas las obleas solares y celdas solares con una mejor relación rendimiento/coste. Además, la presente descripción puede combinarse fácil y eficazmente con procesos de eliminación y modificación de defectos relacionados con metales a nivel de las obleas para producir una celda solar FV altamente eficiente.

De acuerdo con un aspecto de la materia objeto descrita, se proporcionan un procedimiento de formación de lingotes de semiconductores y un sistema asociado para el uso de una materia prima de silicio de bajo grado que incluye la formación en un dispositivo de crisol de un silicio fundido a partir de una materia prima de silicio de bajo grado. El procedimiento y el sistema realizan una solidificación direccional del silicio fundido para formar un lingote de silicio en el dispositivo de crisol. La solidificación direccional forma una cantidad generalmente solidificada de silicio y una cantidad generalmente fundida de silicio, donde la solidificación direccional aumenta la altura de la cantidad combinada solidificada y fundida de silicio. El procedimiento y el sistema incluyen retirar del dispositivo de crisol al menos una porción de la cantidad generalmente fundida de silicio mientras que se conserva en el dispositivo de crisol la cantidad generalmente solidificada de silicio, en el que el aumento de la altura permite que la al menos una porción de la cantidad generalmente fundida de silicio alcance la altura del paso. El procedimiento y el sistema controlan adicionalmente la solidificación direccional de la cantidad generalmente solidificada de silicio para formar un lingote de silicio que posee un grado generalmente superior de silicio que la materia prima de silicio de bajo grado. Aquí se describen una diversidad de pasos para eliminar el silicio fundido contaminado.

Estas y otras ventajas de la materia objeto descrita, así como características novedosas adicionales, serán evidentes a partir de la descripción proporcionada en este documento. El propósito de este resumen no es ser una descripción completa de la materia objeto reivindicada, sino proporcionar una visión general de algunas de las funcionalidades de la materia objeto. Otros sistemas, procedimientos, características y ventajas proporcionadas aquí serán evidentes para un experto en la técnica tras el examen de las siguientes figuras y la descripción detallada. Se pretende que cada uno de dichos sistemas, procedimientos, características y ventajas adicionales que se incluyen dentro de esta descripción, esté dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Las características, naturaleza y ventajas de la materia objeto descrita pueden hacerse más evidentes a partir de la descripción detallada expuesta a continuación cuando se toma junto con los dibujos en los que se identifican caracteres de referencia similares de forma correspondiente a lo largo de todo el documento y en los que:

La **figura 1** es un diagrama de flujo de una técnica que representa generalmente los procedimientos conocidos de formación de una celda solar;

la **figura 2**, por el contrario, muestra generalmente un procedimiento de formación en conjunto de una celda solar que puede incorporar las enseñanzas de la materia objeto descrita;

la **figura 3** ilustra una realización de un entorno de proceso en el que conseguir los resultados de la presente invención;

la **figura 4** muestra un flujo de proceso de acuerdo con la presente descripción para obtener un lingote de silicio de pureza superior a partir de una materia prima de silicio de bajo grado;

5 las **figuras 5 y 6** presentan una realización de un proceso de retirada de silicio fundido como se describe por la presente materia objeto;

las **figuras 7 y 8** ilustran diversas formas de precondicionar silicio fundido como puede ser la aplicación de la presente descripción;

10 las **figuras 9 a 11** presentan una realización alternativa de un proceso de retirada de silicio que no es parte de la invención;

las **figuras 12 y 13** muestran una realización alternativa de un proceso de retirada de silicio dentro del alcance de la presente descripción; y

las **figuras 14 y 15** proporcionan diferentes aspectos de un dispositivo de crisol que puede encontrar aplicación dentro de la materia objeto de la presente descripción.

15

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA REALIZACIÓN ESPECÍFICA

20 El procedimiento y el sistema de la presente descripción proporcionan un proceso de formación de lingotes de semiconductores para producir un lingote de silicio de pureza superior o de semiconductores usando una materia prima de silicio de baja pureza o alta impureza o semiconductores. El procedimiento descrito actualmente presenta un procedimiento de fusión combinando etapas de procesamiento realizadas previamente por separado, así como haciendo un mejor uso de la fase de refrigeración inherente en el procedimiento de formación de lingotes de silicio. La presente descripción incluye un paso para retirar el silicio fundido para dejar el lingote de silicio mientras que tiene lugar la formación del lingote. El silicio fundido que la materia objeto descrita elimina generalmente posee una mayor cantidad de impurezas que el lingote de silicio que se está formando.

25

30 La retirada de la fusión de silicio más contaminado evita una retro-contaminación por las impurezas metálicas en el lingote de silicio que ya se ha formado. Sin la preocupación por una retrodifusión de dichas impurezas, son posibles adicionalmente mejoras y un control del proceso de lingotes de silicio. Por ejemplo, existe la posibilidad de mantener un lingote a una temperatura elevada para evitar las tensiones que de otro modo existirían en un sistema que no es capaz de evitar la retrodifusión de las impurezas metálicas. Junto con la reducción de la tensión se reduce la formación de defectos estructurales relacionados con la tensión en los lingotes respectivos, dando lugar a una mejora adicional de la calidad de los lingotes.

30

35 La última ventaja es la reducción del coste total, ya que puede usarse una materia prima de grado inferior para la solidificación direccional de un lingote de silicio. Los lingotes fabricados por el procedimiento y el sistema descritos actualmente son de calidad superior en comparación con los lingotes producidos mediante técnicas de solidificación conocidas usando una materia prima de pureza inferior. Entre diversas ventajas técnicas y logros descritos en este documento, algunos de particular importancia incluyen la capacidad de reducir la cantidad de impurezas metálicas y no metálicas presentes en un lingote de semiconductor, tales como pueden ser los útiles en la fabricación de celdas solares. Otra ventaja específica es evitar las regiones de alta concentración de no metales, principalmente B, P y C, en regiones superiores de lingotes hechos de materiales de materias primas de Si UMG.

40

45 Estableciendo un contexto para la presente descripción, la **figura 1** representa un procedimiento conocido **10** que comienza en la etapa **12**. En la etapa **12**, el silicio de GM u otro de bajo grado se introduce en el flujo de proceso conocido de formación de la oblea **10**. El flujo de proceso conocido **10** extrae silicio de alto grado del silicio de GM en la etapa **14**. La etapa de extracción del silicio de alto grado **14** es una secuencia de procesamiento de alto coste que da como resultado el silicio de GE. Este es el tipo de material de materia prima de silicio usado para la fabricación del lingote en la etapa **16**. El flujo de proceso conocido **10** incluye cortar en rodajas el lingote de silicio, generalmente usando una sierra de hilo para obtener una oblea de silicio en la etapa **18**. Después, las obleas de silicio resultantes se introducen en el proceso de formación de la celda solar **20**.

50

55 La **figura 2** representa, en términos generales, aspectos novedosos de un flujo de proceso de formación de celdas solares **30** en el que la presente descripción muestra ventajas particulares. El flujo de proceso **30** incluye el uso de silicio de GM en la etapa **32** que está purificado en algún grado para convertirse en silicio RMG o UMG. La calidad alcanzada del silicio es todavía un silicio de bajo grado **34**. Por consiguiente, la calidad del silicio **36** está relacionada con un coste muy inferior en comparación con la calidad del silicio **14**. Además, el silicio de bajo grado en la etapa **36** posee un contenido superior de impurezas metálicas y de otro tipo en comparación con la calidad del silicio **14**. En la etapa **38**, puede tener lugar la formación del lingote de silicio. La etapa **40** representa la formación de obleas de silicio, es decir, el corte en rodajas del lingote de silicio. El flujo de proceso de formación de celdas solares descrito **30** puede introducir una etapa de tratamiento de las obleas **40**, también denominada etapa de preproceso, antes de comenzar el proceso de las celdas. Finalmente, el proceso de formación de las celdas solares se produce en la etapa **42**.

60

65 En las etapas **34 y 36** del flujo de proceso **30**, las enseñanzas de la materia objeto descrita afectan a la formación de un lingote de silicio. Con el fin de especificar un entorno de proceso en el que aplicar las enseñanzas de la presente

descripción, la **figura 3** ilustra el entorno de proceso **50**. En la **figura 3**, el crisol **52** contiene una fusión de silicio **54**. Las zonas de calentamiento **58** rodean los lados y el fondo del crisol **42**. La cámara de aislamiento **60** establece adicionalmente un entorno de proceso junto con el crisol **52** para controlar la temperatura y para establecer una atmósfera de proceso. El sistema de refrigeración líquida **62** rodea la cámara de aislamiento **60**, cuya cámara **64** puede penetrar para permitir la observación de la fusión de silicio **52**.

El entorno de proceso **50** tiene una altura **66**, cuyo crisol **54** se extiende verticalmente. Sin embargo, el mecanismo de descenso del control de proceso mejorado **68**, que tiene un radio **70**, puede moverse verticalmente hacia abajo en el marco inferior **72** para mostrar diferentes porciones del crisol **54** en zonas de calentamiento de diferentes temperaturas **58** más rápidamente o de más maneras variables que pueden dirigirse al control de la zona de calentamiento. El entorno de procesamiento **50** proporciona una cámara de crecimiento cerrada herméticamente que tiene un vacío, por ejemplo, por debajo de 1×10^{-3} Torr y un ciclo purgado varias veces con argón a 68,95 kPa (10 psig) para expulsar cualquier porción de oxígeno restante en la cámara. Las zonas de calentamiento **58** pueden calentarse mediante una bobina de inducción multi-vueltas en un circuito paralelo con un banco de condensadores de sintonía.

La **figura 4** presenta un diagrama de flujo ejemplar **80** para el proceso de formación del lingote de silicio descrito actualmente. Comenzando en la etapa **82**, el proceso de formación de lingotes de silicio **80** carga un crisol, tal como el crisol **54** o las diversas realizaciones de crisol que se describen a continuación, con una materia prima de silicio de bajo grado. En la etapa **84**, el silicio fundido se forma a partir de la materia prima de silicio de bajo grado debido a un proceso de calentamiento. Una vez que se forma una cantidad perceptible de fusión de silicio en el crisol, se produce una determinación de si la fusión de silicio se forma bajo un paso predeterminado para su eliminación en la etapa **86**. Si es así, una prueba posterior **88** determina si existe la necesidad de añadir más materia prima de silicio de bajo grado al crisol.

En esencia, esta determinación sirve para garantizar que, ya que la solidificación direccional de la fusión de silicio **52** forma un lingote de silicio de grado superior, la fusión de silicio contaminado progresivamente tiene finalmente un paso para su eliminación en el estado fundido. Mediante la eliminación de la fusión de silicio contaminado **52** mientras está en el estado sólido, es posible evitar la retrodifusión de los contaminantes en el lingote de silicio de pureza superior, como se describirá en más detalle a continuación.

Ahora, una vez que existe una cantidad suficiente de materia prima de silicio de bajo grado y, por lo tanto, de la fusión de silicio **52** en el crisol **54**, puede producirse un proceso opcional o un conjunto de procesos que preconditionan la fusión de silicio **52**. Dichas etapas de preconditionamiento pueden incluir una o una combinación de las etapas para la extracción de impurezas que se obtienen a partir del silicio de bajo grado.

Las diversas etapas de preconditionamiento de la fusión de silicio pueden incluir una etapa de nucleación de burbujas de gas **90**, una etapa de agitación de energía ultrasónica **92**, o una combinación de dichas etapas o adicionalmente etapas que incluyen transferencia de energía electromagnética a la fusión, tal como la elipse **94** representa. Además, como la flecha **96** sugiere, dichas etapas pueden omitirse. Según muestra adicionalmente la etapa **98**, dicho preconditionamiento puede incluir una etapa de incluir diversos aditivos a la fusión de silicio **52**.

A continuación, el proceso de la presente descripción incluye la iniciación de la solidificación direccional de la fusión de silicio **52** para comenzar la formación del lingote de silicio, en la etapa **100**. Según la solidificación direccional de la fusión forma el lingote de silicio, se produce una transformación de fase del silicio de líquido a sólido. Debido a la transformación de fase, se produce la expansión del volumen de silicio dentro del crisol **54**, aumentando el nivel de silicio fundido y de silicio solidificado combinados actuales, como representa la etapa **102**. Según el nivel de silicio dentro del crisol continúa aumentando, tiene lugar una separación del silicio fundido. Esta separación se produce debido a las características físicas de una o más realizaciones del crisol **52** como se muestra y se describe en más detalle a continuación.

Con la separación del silicio fundido del silicio cristalizado, como indica la etapa **104**, el silicio que permanece en el crisol **52** es de una pureza superior que la materia prima de silicio a partir de la cual se forma la fusión de silicio. La extracción de la fusión de silicio lleva consigo una mayor concentración de impurezas. Básicamente, el resultado es la eliminación o la reducción sustancial de la probabilidad de que las impurezas procedentes de la fusión de silicio **52** se retrodifundan al lingote de silicio.

Debido a la reducción de la probabilidad de la retrodifusión de impurezas puede producirse la etapa **106**. En la etapa **106**, el proceso de formación del lingote **80** reduce las tensiones de cristalización que surgen en un lingote de silicio durante los procesos de refrigeración más rápidos. Una menor preocupación por la retrodifusión de impurezas durante un proceso de refrigeración más lento permite controlar la velocidad de refrigeración de silicio cristalizado para aliviar las tensiones de cristalización. La reducción de la tensión de cristalización en el lingote de silicio resultante aún produce adicionalmente un lingote de silicio de pureza superior, como se muestra en la etapa **108**.

Las **figuras 5 y 6** muestran en más detalle aspectos de la etapa **102** del flujo de proceso **80**, en el que la expansión volumétrica del silicio en la forma sólida o de cristalización facilita la eliminación de la fusión de silicio contaminado

en aumento. En la **figura 5** aparece el estado de proceso **110**, que incluye un crisol **112** que proporciona un paso para la eliminación de la fusión de silicio. El crisol **112** contiene en el volumen de proceso **114** tanto una porción de lingote de silicio **116** como la fusión de silicio **118**. La interfaz **120** separa la porción del lingote de silicio **116** de la fusión de silicio **118**. El crisol **112** contiene adicionalmente una pared intersticial **122** que separa el volumen de proceso **114** del volumen de flujo de la fusión de silicio **124**.

La **figura 6** muestra la elevación progresiva de la interfaz **120** en el estado **130** del proceso de formación del lingote de silicio **80**. Por lo tanto, según se produce la expansión volumétrica del silicio solidificado **116**, tiene lugar tanto el nivel de elevación de la interfaz **120** como la contaminación en aumento de la fusión de silicio **118**. El efecto es elevar la fusión de silicio a y por encima de la altura inferior de la pared intersticial **122**. Es decir, la altura inferior de la pared intersticial **122** forma un paso **132** para la eliminación de la fusión de silicio **118**. Como se mostrará a continuación, el paso **132** puede formarse de numerosas maneras. Sin embargo, la realización de las **figuras y 6** muestran una forma deseable y sin embargo ingeniosamente sencilla de realizar la eliminación de la fusión de silicio **118** del volumen de proceso de formación del lingote **114** del crisol **112**.

Para dejar más claro cómo el proceso descrito actualmente puede precondicionar la fusión de silicio **118**, las **figuras 7 y 8** muestran, respectivamente, el uso de nucleación de burbujas y la combinación de la nucleación de burbujas y la agitación de energía ultrasónica con el fin de facilitar la extracción de impurezas durante las primeras etapas de la solidificación direccional del silicio. Por lo tanto, se hace referencia a la **figura 7**, el estado de proceso **140**, en el que pueden insertarse tubos de gas **142** en la fusión de silicio **118**. La fusión de silicio **118** puede recibir a través de los tubos de gas ciertas cantidades de gases, tales como oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, vapor de agua, CO₂ o gases que contienen cloro, tales como HCl o combinaciones de los gases anteriores y otros gases. Estos gases reaccionan con las impurezas disueltas en la fusión de silicio **118** y forman compuestos volátiles que se evaporan de la fusión. Esto puede dar como resultado una porción de lingote de silicio más pura **116** (**figura 5**) durante la etapa de solidificación direccional posterior **100** del proceso de formación del lingote de silicio **80**.

La **figura 8** muestra en el estado **150** una realización de una etapa de precondicionamiento **92** de la fusión de silicio **118**, en la que una fuente de energía ultrasónica **152** puede conectarse con tubos de gas **142**. Es decir, el tubo de gas **142** no sólo puede servir como un conducto para administrar burbujas de la nucleación **114**, sino que también puede servir como un paso de energía ultrasónica para transmitir energía desde la fuente de energía ultrasónica **152** hasta la fusión de silicio **118**. Aquí, además, el precondicionamiento de la fusión de silicio **118** promueve una porción de la fusión de silicio resultante más pura **116** mediante la extracción de impurezas que se obtienen a partir del silicio de bajo grado.

Las **figuras 9 a 11** expanden el concepto de un paso para la eliminación de la fusión de silicio contaminado. Sin embargo, esta parte del concepto no pertenece a la invención. En particular, la **figura 9** muestra que, junto con un crisol, tal como el crisol **54**, puede haber una porción de lingote de silicio **116** y una fusión de silicio **118** con la interfaz **120**. Ya que, como se ha explicado, con el crecimiento de la porción del lingote de silicio **116**, se han concentrado impurezas en la fusión de silicio **118**. La realización de la **figura 9** muestra un paso para la eliminación de la fusión de silicio contaminado **188**.

Las **figuras 9 a 11** que no son parte de la invención, muestran una fase de proceso **130** en la que el dispositivo de fieltro poroso **132** proporciona un material que muestra una temperatura de fusión significativamente superior que la de la fusión de silicio **118**. Mediante el descenso del dispositivo de fieltro poroso **112** en la fusión de silicio **118**, se produce la absorción de la fusión de silicio **118**. Por lo tanto, la **figura 10** demuestra en la fase de proceso **134** que el dispositivo de fieltro poroso **132** ha absorbido una porción significativa, si no toda la fusión de silicio **118**, permitiendo de este modo la eliminación de la fusión de silicio contaminado **118** del crisol **54**. La **figura 11** muestra en la fase de proceso **136** la eliminación del dispositivo de fieltro poroso **122** del crisol **54**, llevando consigo la fusión de silicio contaminado **118**.

Las **figuras 12 y 13** representan una realización adicional de la presente descripción en la que el paso para la eliminación de la fusión de silicio **118** incluye un dispositivo de válvula de paso móvil. En particular, la **figura 12** representa un estado de proceso **140** para una realización de crisol **142** que incluye un conjunto de válvula de paso de dos partes **144**. El conjunto de válvula de paso **144** incluye el obús **146**, que penetra a través de la apertura externa del crisol **148** y la apertura interna **150** de la pared intersticial **152**. Cuando se inserta a través de tanto la apertura externa **148** como de la apertura interna **150**, el obús **146** mantiene un volumen de flujo vacío **154** de la fusión de silicio **118**.

Según se forma la porción del lingote de silicio **116**, la fusión de silicio **118** se desarrolla en un volumen de proceso del crisol **152** por encima de tanto la interfaz **120** como de la apertura interna **150**. Una vez que la porción del lingote de silicio alcanza aproximadamente el nivel de la apertura interna **150**, el obús **146** puede retirarse a través de la apertura interna **150**.

La **figura 13** muestra en el estado de proceso **160** que mediante la retirada del obús **146** de la apertura interna **150**, mientras se mantiene el obús **146** en la apertura externa **148** fluye un paso para la fusión de silicio **118** en el volumen de flujo **154**. El flujo de fusión de silicio **118** a través del paso de la apertura interna **150** y en el volumen de

flujo **154** elimina del volumen de proceso **152** la fusión de silicio contaminado **118**, evitando de este modo un grado significativo de retrodifusión de contaminantes en etapas de procesamiento posteriores.

A continuación, pueden existir diversas realizaciones de uno o más crisoles que proporcionan el paso tal como se ha descrito en las **figuras 14 y 15** demuestran todavía una realización adicional de un dispositivo de crisol **170** que es adecuado para conseguir los fines de la presente descripción. En particular, el dispositivo de crisol **170** puede incluir el volumen de proceso **172** para recibir una materia prima de silicio de bajo grado y producir en éste la porción del lingote de silicio. La pared interna **174** puede rodear el volumen de proceso **172**. El volumen de flujo **176** rodea la pared interna **174**, y la pared externa **178** rodea el volumen de flujo **176**.

La **figura 15** representa adicionalmente el dispositivo de crisol **170** que incluye el conjunto de válvula de paso **144** que tiene, como se ha descrito anteriormente, el obús **146** que penetra a través de la apertura externa del volumen de flujo **180** de la pared externa **178** y la apertura interna **182** del entorno de proceso **172**. El funcionamiento del conjunto de la válvula de paso **144** es como se ha descrito anteriormente, con la distinción de que con el volumen de flujo **176** que rodea la pared interna **174**, la retirada del obús **146** hace que la fusión de silicio **118** rodee la pared interna **174**.

En resumen, la materia objeto descrita proporciona un procedimiento y un sistema para la formación de un lingote de silicio que incluye formar dentro de un dispositivo de crisol un silicio fundido a partir de una materia prima de silicio de bajo grado y realizar una solidificación direccional del silicio fundido para formar un lingote de silicio en el dispositivo de crisol. La solidificación direccional forma una cantidad generalmente solidificada de silicio y una cantidad generalmente fundida de silicio. El procedimiento y el sistema incluyen retirar del dispositivo de crisol al menos una porción de la cantidad generalmente fundida de silicio mientras que se conserva en el dispositivo de crisol la cantidad generalmente solidificada de silicio. El control de la solidificación direccional de la cantidad generalmente solidificada de silicio forma un lingote de silicio que posee un grado de silicio generalmente superior que la materia prima de silicio de bajo grado. Dicho control puede incluir prolongar la duración de la solidificación direccional de la cantidad generalmente solidificada de silicio para reducir las tensiones materiales que surgen de la cristalización del lingote de silicio.

El procedimiento y el sistema pueden precondicionar el silicio fundido para extraer las impurezas que se obtienen a partir del silicio de bajo grado, tal como mediante la introducción de una nucleación de burbujas en el silicio fundido, la transmisión de energía ultrasónica o energía electromagnética en el silicio fundido, y la combinación del silicio fundido con un aditivo para facilitar la extracción de las impurezas procedentes del silicio fundido.

Diversas realizaciones de la presente descripción incluyen retirar del dispositivo de crisol al menos una porción de la cantidad generalmente fundida de silicio haciendo fluir la cantidad generalmente fundida de silicio a través de un paso asociado con el dispositivo de crisol. Las realizaciones del paso pueden incluir una pared intersticial inferior que separa un primer volumen del dispositivo de crisol de un segundo volumen del dispositivo de crisol, conteniendo el primer volumen del dispositivo de crisol la cantidad generalmente solidificada de silicio y la cantidad generalmente fundida de silicio. En dicha realización, la pared intersticial inferior tiene adicionalmente una altura que se aproxima a la altura de un nivel de interfaz predeterminado entre la cantidad generalmente solidificada de silicio y la cantidad generalmente fundida de silicio en un punto predeterminado durante la solidificación direccional. La pared intersticial inferior permite al menos que una porción de la cantidad generalmente fundida de silicio fluya desde el primer volumen del dispositivo de crisol hasta el segundo volumen del dispositivo de crisol, separando de este modo la porción de la cantidad generalmente fundida de silicio de la cantidad generalmente solidificada de silicio.

Otra realización hace fluir una porción de la cantidad generalmente fundida de silicio hacia el segundo volumen que rodea el primer volumen. Otro paso puede incluir un dispositivo de fieltro para absorber la cantidad generalmente fundida de silicio que puede sumergirse en la cantidad generalmente fundida de silicio. El silicio fundido se absorbe en el dispositivo de fieltro y se elimina para llevar consigo la porción absorbida del silicio generalmente fundido. El paso comprende un conducto de drenaje y un dispositivo de cierre asociado para controlar el flujo de la cantidad generalmente fundida de silicio a través del conducto de drenaje y comprendiendo adicionalmente la etapa de situar de manera controlable el dispositivo de cierre para controlar el flujo de la cantidad generalmente fundida de silicio procedente del dispositivo de crisol. El procedimiento disocia la cantidad generalmente fundida de silicio de la cantidad generalmente solidificada de silicio.

Otra realización más de la presente descripción proporciona un conducto de drenaje que separa un primer volumen del dispositivo de crisol de un segundo volumen del dispositivo de crisol. Un dispositivo de cierre se asocia para controlar el flujo de la cantidad generalmente fundida de silicio a través del conducto de drenaje. Adicionalmente, el procedimiento sitúa de manera controlable el dispositivo de cierre para controlar el flujo de silicio fundido del primer volumen al segundo volumen para disociar el silicio fundido del silicio. El segundo volumen puede rodear el primer volumen.

Como resultado del uso de la materia objeto descrita actualmente, se produce una mejora en las propiedades de los materiales semiconductores de bajo grado, tales como el silicio de grado metalúrgico mejorado (UMG). Dicha mejora

5 permite el uso de silicio de UMG, por ejemplo, en la producción de celdas solares que pueden usarse en la generación de energía solar y usos relacionados. Además, el procedimiento y el sistema de la presente descripción benefician particularmente la formación de celdas solares de semiconductores usando UMG u otros materiales semiconductores de grado no electrónico. La presente descripción puede permitir la formación de celdas solares en mayores cantidades y en un mayor número de instalaciones de fabricación de lo que hasta ahora ha sido posible.

10 Por lo tanto, las características y funciones del procedimiento y el sistema descritos en este documento forman un lingote de silicio de mayor pureza a partir de materia prima de silicio de pureza inferior. Aunque se han mostrado y descrito en detalle en este documento diversas realizaciones que incorporan las enseñanzas de la presente descripción, los expertos en la técnica pueden idear fácilmente muchas otras realizaciones variadas que aún incorporen estas enseñanzas. Por lo tanto, la descripción anterior de las realizaciones preferidas se proporciona para permitir a cualquier experto en la técnica hacer o usar la materia objeto reivindicada. Serán fácilmente evidentes para los expertos en la técnica diversas modificaciones de estas realizaciones, y los principios genéricos definidos en este documento pueden aplicarse a otras realizaciones sin el uso de la facultad innovadora. Así, la materia objeto reivindicada no pretende limitarse a las realizaciones mostradas en este documento, sino que será acorde con el alcance más amplio coherente con los principios y características novedosas descritas en este documento.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento para formar un lingote de silicio usando una materia prima de silicio de bajo grado, comprendiendo el lingote de silicio un silicio de mayor grado que la materia prima de silicio de bajo grado, que comprende las etapas de:
- 5 formar en un dispositivo de crisol (112), (142), (170) un silicio fundido a partir de una materia prima de silicio de bajo grado (34), (52), (84);
 10 realizar una solidificación direccional del silicio fundido para formar un lingote de silicio en el dispositivo de crisol, formando la solidificación direccional una cantidad generalmente solidificada de silicio (116) y una cantidad generalmente fundida de silicio (118), aumentando la solidificación direccional la altura de la cantidad combinada solidificada y fundida de silicio (102);
 15 retirar del dispositivo de crisol al menos una porción de la cantidad generalmente fundida de silicio mientras que se conserva en el dispositivo de crisol la cantidad generalmente solidificada de silicio (104), en el que dicha retirada comprende que fluya la al menos una porción de la cantidad generalmente fundida de silicio a través de un paso (132) (150) (182) asociado con dicho dispositivo de crisol, en el que el aumento de la altura permite que la al menos una porción de la cantidad generalmente fundida de silicio (118) alcance la altura del paso; y
 20 controlar dicha solidificación direccional de dicha cantidad generalmente solidificada de silicio para formar un lingote de silicio (36) (108) que posee un grado de silicio generalmente superior que dicha materia prima de silicio de bajo grado.
2. El procedimiento de la reivindicación 1, que comprende adicionalmente la etapa de prolongar la duración de dicha solidificación direccional de dicha cantidad generalmente solidificada de silicio para reducir las tensiones materiales que surgen de la cristalización de dicho lingote de silicio.
- 25 3. El procedimiento de la reivindicación 1, que comprende adicionalmente la etapa de precondicionar dicho silicio fundido para extraer las impurezas que se obtienen a partir de dicho silicio de bajo grado.
4. El procedimiento de la reivindicación 3, en el que dicha etapa de precondicionar dicho silicio fundido comprende adicionalmente la etapa de introducir una nucleación de burbujas de gas en dicho silicio fundido.
- 30 5. El procedimiento de la reivindicación 3, en el que dicha etapa de precondicionar dicho silicio fundido comprende adicionalmente la etapa de introducir una nucleación de burbujas de gas en dicho silicio fundido usando gases del grupo que consiste básicamente en oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, vapor de agua, dióxido de carbono y gases que contienen cloro.
- 35 6. El procedimiento de la reivindicación 3, en el que dicha etapa de precondicionar dicho silicio fundido comprende adicionalmente la etapa de transmitir energía ultrasónica o energía electromagnética en dicho silicio fundido para mejorar la extracción de impurezas de dicho silicio fundido.
- 40 7. El procedimiento de la reivindicación 3, en el que dicha etapa de precondicionar dicho silicio fundido comprende adicionalmente la etapa de combinar dicho silicio fundido con un aditivo para ayudar en la extracción de dichas impurezas de dicho silicio fundido.
- 45 8. El procedimiento de la reivindicación 1, en el que dicho paso comprende una pared intersticial inferior que separa un primer volumen de dicho dispositivo de crisol de un segundo volumen de dicho dispositivo de crisol, conteniendo dicho primer volumen de dicho dispositivo de crisol dicha cantidad generalmente solidificada de silicio y dicha cantidad generalmente fundida de silicio;
- 50 teniendo adicionalmente dicha pared intersticial inferior una altura que se aproxima a la altura de un nivel de interfaz predeterminado entre dicha cantidad generalmente solidificada de silicio y dicha cantidad generalmente fundida de silicio en un punto predeterminado durante dicha solidificación direccional; y
 55 permitiendo dicha pared intersticial inferior que al menos una porción de dicha cantidad generalmente fundida de silicio fluya desde dicho primer volumen de dicho dispositivo de crisol hasta dicho segundo volumen de dicho dispositivo de crisol, separando de este modo dicha porción de dicha cantidad generalmente fundida de silicio de dicha cantidad generalmente solidificada de silicio.
9. El procedimiento de la reivindicación 8, en el que dicho segundo volumen rodea dicho primer volumen y que comprende adicionalmente la etapa de hacer fluir dicha al menos una porción de dicha cantidad generalmente fundida de silicio hasta dicho segundo volumen que rodea dicho primer volumen.
- 60 10. El procedimiento de la reivindicación 1, en el que dicho paso comprende un conducto de drenaje y un dispositivo de cierre asociado para controlar el flujo de dicha cantidad generalmente fundida de silicio a través de dicho conducto de drenaje y que comprende adicionalmente la etapa de situar de manera controlable dicho dispositivo de cierre para controlar el flujo de dicha cantidad generalmente fundida de silicio procedente de dicho dispositivo de crisol, disociando de este modo al menos una porción de dicha cantidad generalmente fundida de
- 65

silicio de dicha cantidad generalmente solidificada de silicio.

- 5 11. El procedimiento de la reivindicación 1, en el que dicho paso comprende un conducto de drenaje que separa un primer volumen de dicho dispositivo de crisol de un segundo volumen de dicho dispositivo de crisol, y un dispositivo de cierre asociado para controlar el flujo de dicha cantidad generalmente fundida de silicio a través de dicho conducto de drenaje, y que comprende adicionalmente las etapas de situar de manera controlable dicho dispositivo de cierre para controlar el flujo de dicha cantidad generalmente fundida de silicio de dicho primer volumen hacia dicho segundo volumen, disociando de este modo al menos una porción de dicha cantidad generalmente fundida de silicio de dicha cantidad generalmente solidificada de silicio.
- 10 12. El procedimiento de la reivindicación 11, en el que dicho segundo volumen rodea dicho primer volumen y que comprende adicionalmente la etapa de hacer fluir dicha al menos una porción de dicha cantidad generalmente fundida de silicio hacia dicho segundo volumen que rodea dicho primer volumen.
- 15 13. El procedimiento de la reivindicación 1, en el que dicha etapa de control comprende adicionalmente la etapa de mantener dicho lingote de silicio a una temperatura elevada tras la etapa de retirada para retirar los defectos estructurales relacionados con la tensión en dicho lingote de silicio, mejorando de este modo la cantidad del lingote de silicio.
- 20 14. Un sistema para la formación de un lingote de silicio usando una materia prima de silicio de bajo grado, comprendiendo dicho lingote de silicio un silicio de grado superior que dicha materia prima de silicio de bajo grado, que comprende:
- 25 un dispositivo de crisol (112), (142), (170) para recibir y calentar una materia prima de silicio de bajo grado, formando dicha materia prima de silicio de bajo grado (34), (52), (84) un silicio fundido en respuesta a dicho calentamiento; medios de control de la temperatura (58), (68) para realizar una solidificación direccional de dicho silicio fundido con el fin de formar un lingote de silicio en dicho dispositivo de crisol, formando dicha solidificación direccional una cantidad generalmente solidificada de silicio (116) y una cantidad generalmente fundida de silicio (118);
- 30 un mecanismo de eliminación (132) (150) (182) para retirar de dicho dispositivo de crisol al menos una porción de dicha cantidad generalmente fundida de silicio mientras que se mantiene dicha cantidad generalmente solidificada de silicio en dicho dispositivo de crisol, en el que el mecanismo de eliminación emplea la expansión del volumen de silicio en el crisol debido a una transformación de fase para aumentar un nivel de silicio fundido y de silicio solidificado combinados; y
- 35 dicho mecanismo de control de la temperatura (58), (68) para controlar adicionalmente dicha solidificación direccional de dicha cantidad generalmente solidificada de silicio con el fin de formar un lingote de silicio (36) (108) que posea un grado de silicio generalmente superior que dicha materia prima de silicio de bajo grado.

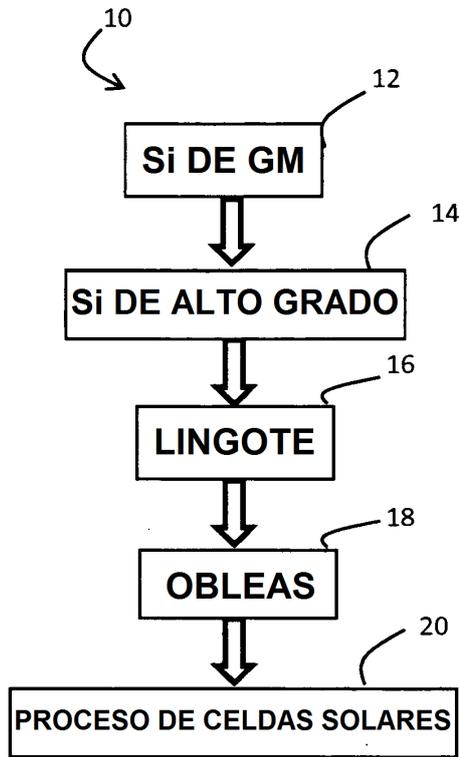


FIG. 1
(TÉCNICA ANTERIOR)

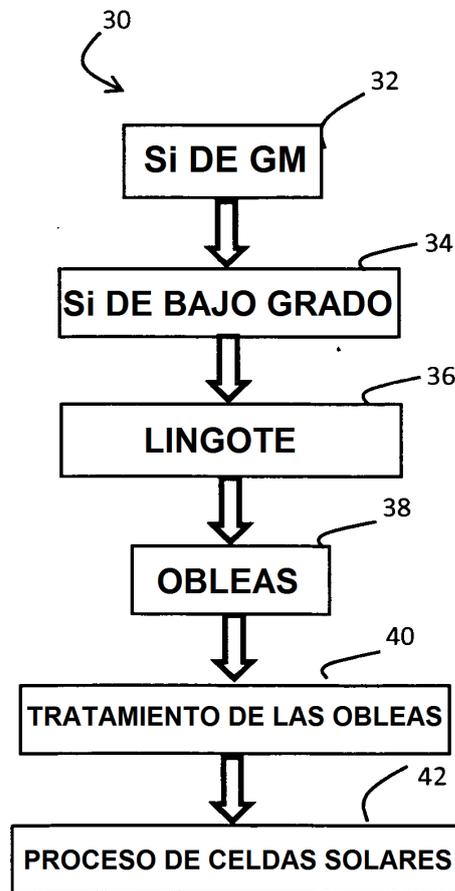


FIG. 2

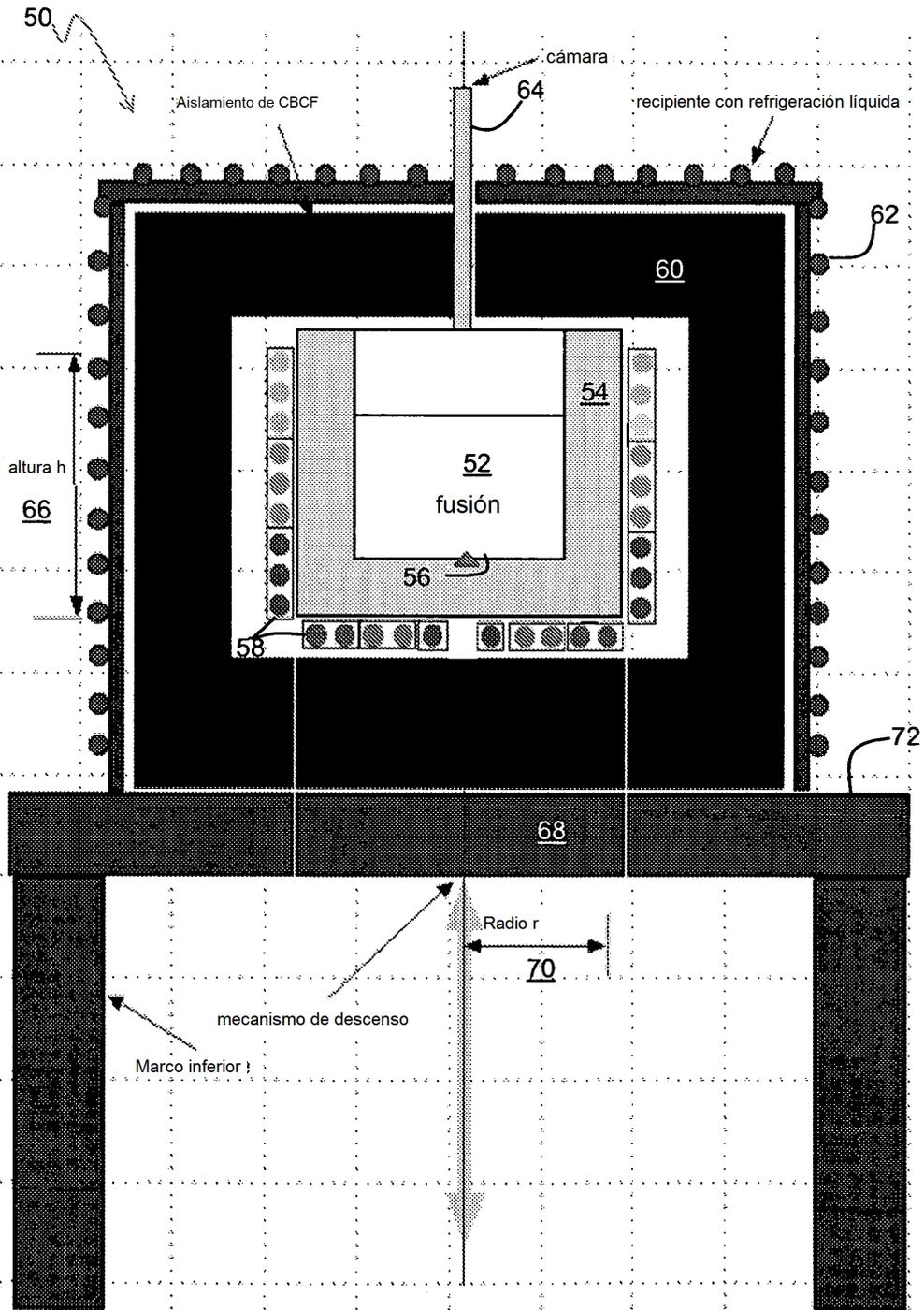


FIG. 3

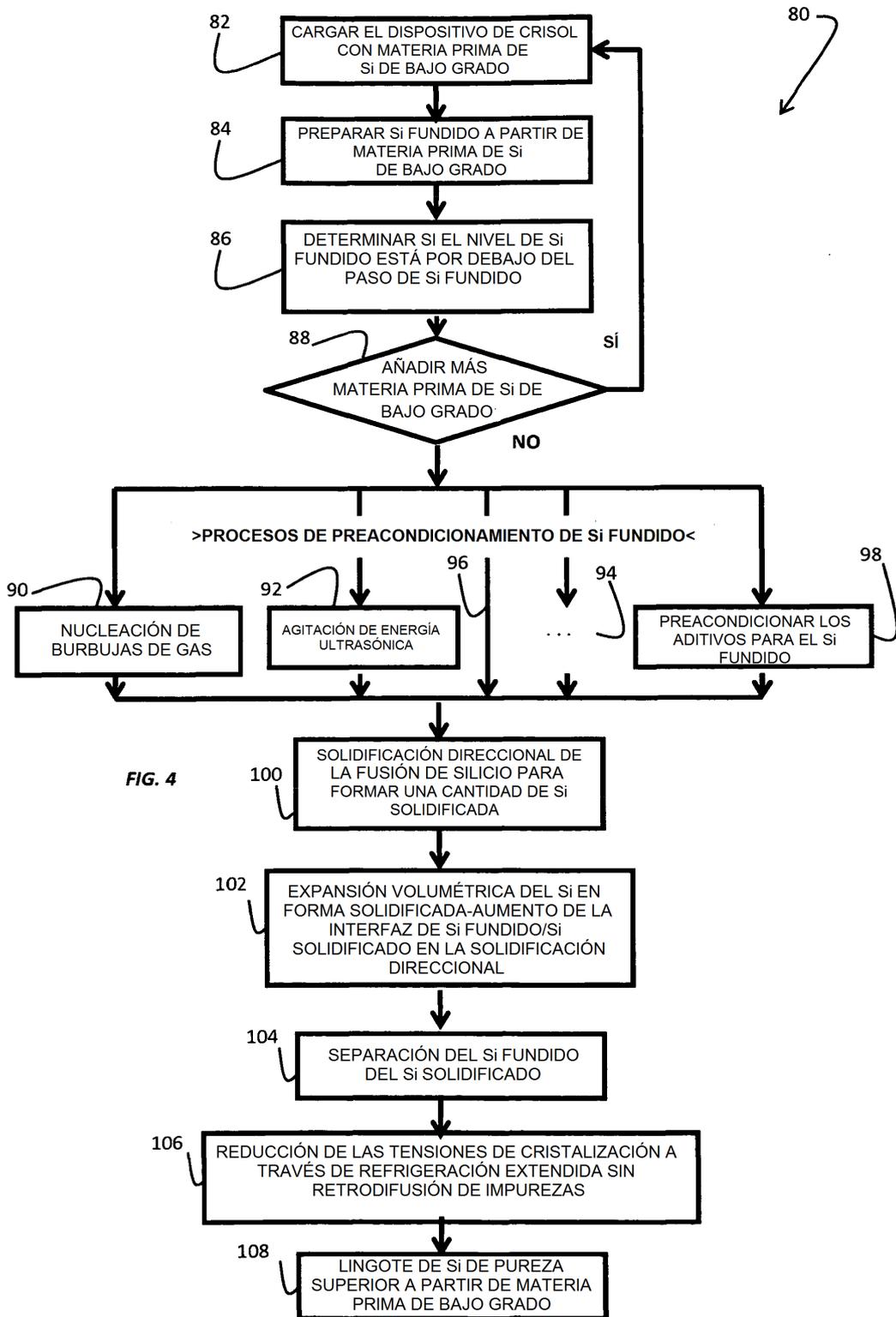


FIG. 4

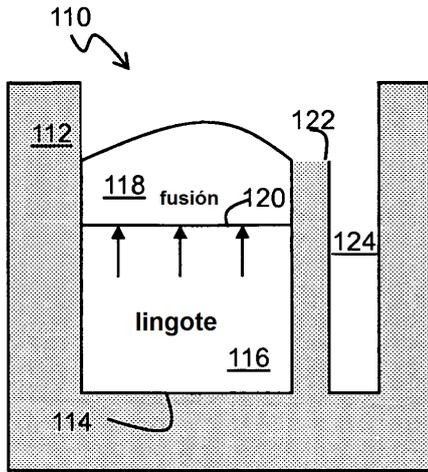


FIG. 5

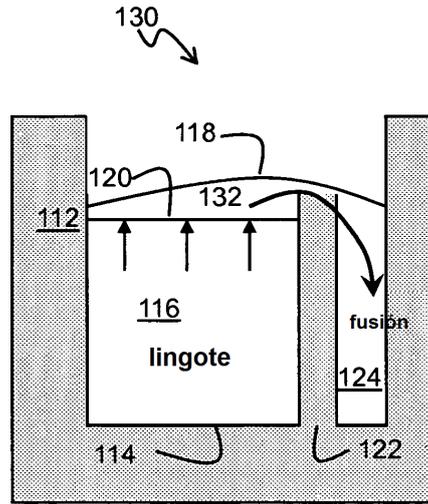


FIG. 6

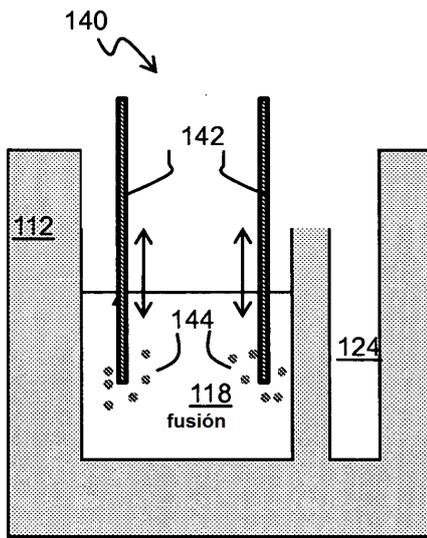


FIG. 7

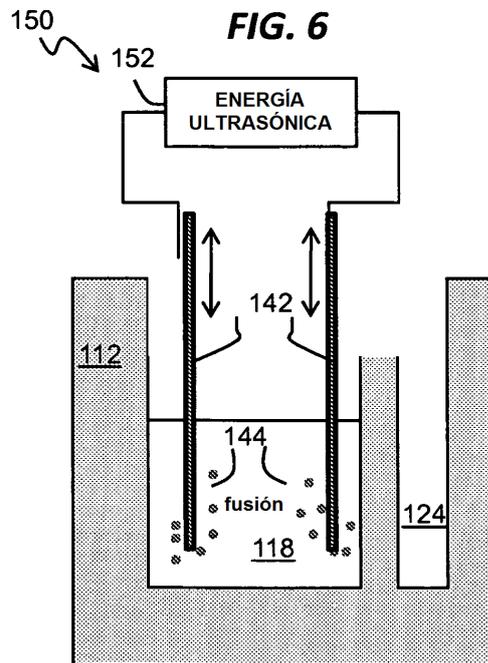


FIG. 8

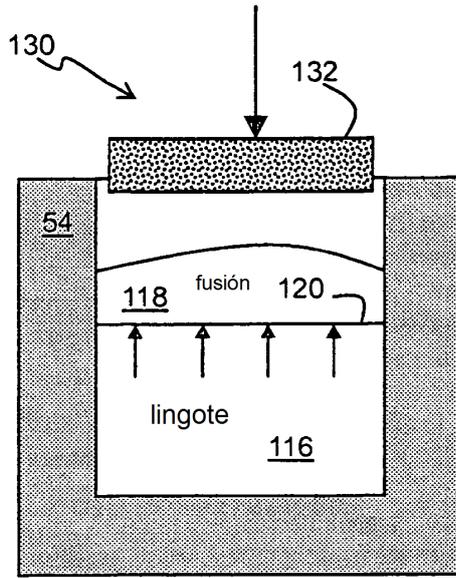


FIG. 9
(no es parte de la invención)

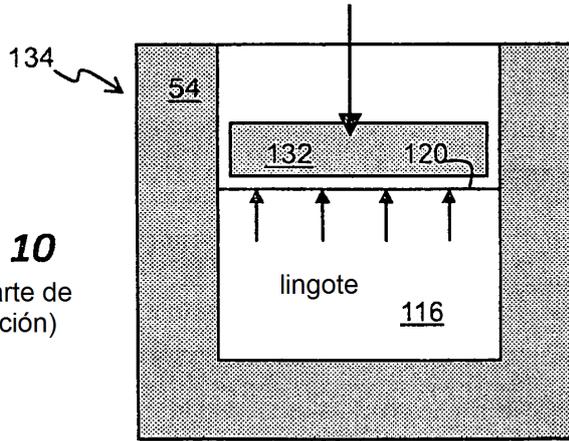


FIG. 10
(no es parte de la invención)

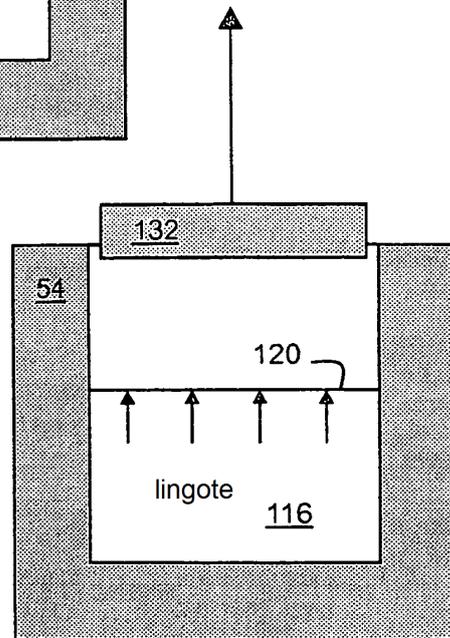
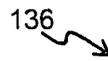
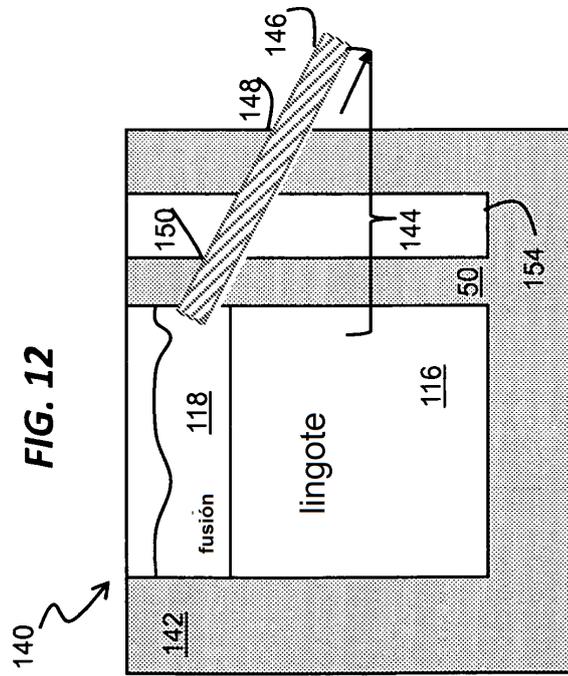
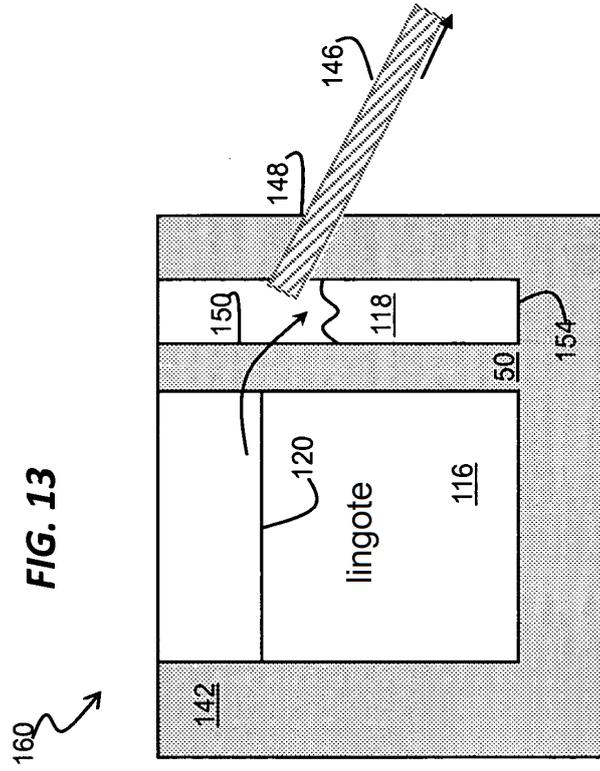


FIG. 11
(no es parte de la invención)



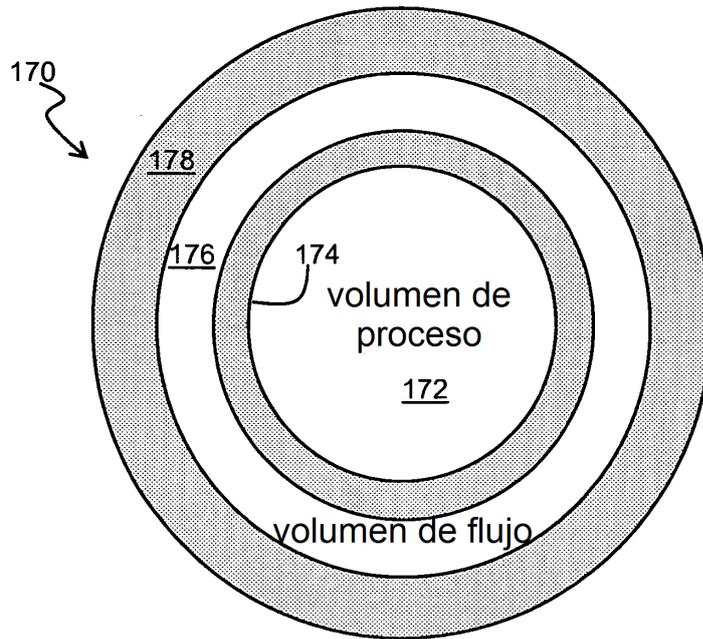


FIG. 14

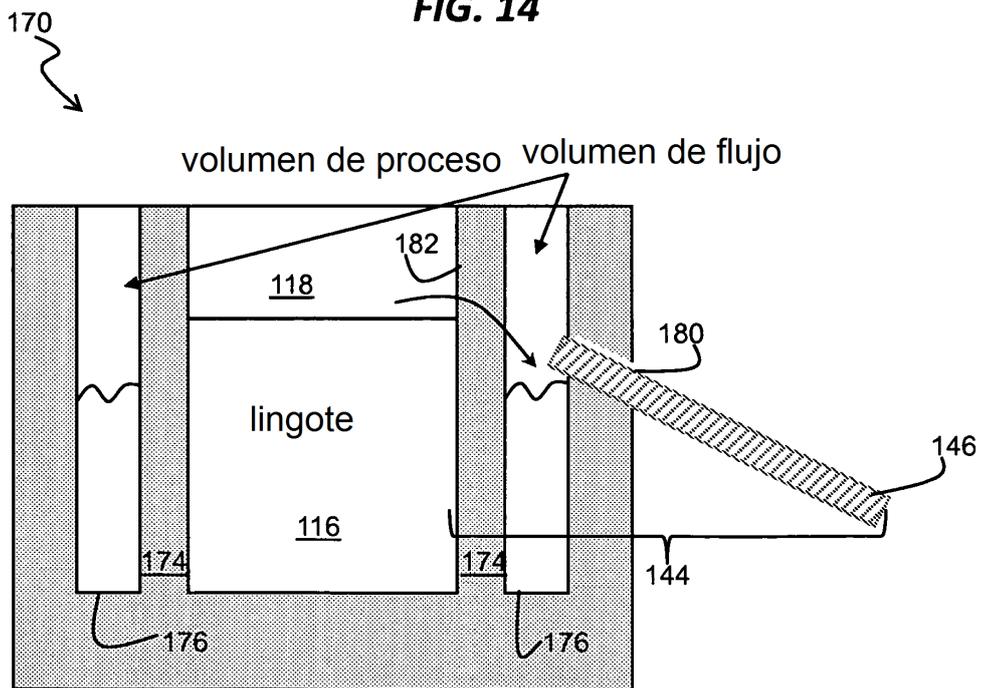


FIG. 15