

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 592 814**

51 Int. Cl.:

**C01B 33/037** (2006.01)

**C30B 30/00** (2006.01)

**C30B 29/06** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **15.08.2012 PCT/US2012/050890**

87 Fecha y número de publicación internacional: **07.03.2013 WO13032703**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.08.2012 E 12827111 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.08.2016 EP 2748355**

54 Título: **Purificación de un metaloide mediante proceso de refundición por arco en vacío de electrodo consumible**

30 Prioridad:

**26.08.2011 US 201161527799 P**

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

**01.12.2016**

73 Titular/es:

**CONSARC CORPORATION (100.0%)  
100 Indel Avenue, P.O. Box 156  
Rancocas, NJ 08073-0156, US**

72 Inventor/es:

**ROBERTS, RAYMOND J.**

74 Agente/Representante:

**DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto**

ES 2 592 814 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

Purificación de un metaloide mediante proceso de refundición por arco en vacío de electrodo consumible

La presente invención está relacionada con la producción de un metaloide purificado tal como silicio mediante un proceso de refundición con arco en vacío de electrodo consumible.

5 Se necesita silicio de alta pureza para muchas clases de componentes electrónicos tales como transistores de silicio, circuitos integrados de silicio y células solares de silicio. Desde la invención del primer transistor de silicio, se han desarrollado muchos procesos para producir silicio que tenga los niveles de pureza requeridos.

10 Un proceso que se ha utilizado para producir metales de alta calidad tales como aceros, superaleaciones a base de níquel, titanio, etc. se conoce como un proceso de refundición por arco en vacío de electrodo consumible (CEVAR, *consumable electrode vacuum arc remelt*). Véase, por ejemplo, las patentes de Estados Unidos n<sup>os</sup>. 3.187.079 (Pestel); 3.344.840 (Buehl et al.); 3.480.716 (Lynch et al.); 4.303.797 (Roberts); 4.569.056 (Veil, Jr.); y la solicitud de patente de Estados Unidos n<sup>o</sup> de publicación 2008/0142188 A1 (Ishigami) para diversos aspectos técnicos del proceso de CEVAR. El proceso de CEVAR se diferencia de una refundición por arco en vacío de electrodo no consumible en la que se utiliza un electrodo no consumible, por ejemplo un electrodo de grafito o tungsteno, para fundir titanio o zirconio, por ejemplo, como se describe en la patente de Estados Unidos n<sup>o</sup> 3.546.348 (Serafino). La solicitud de patente de Estados Unidos n<sup>o</sup> de publicación 2010/0154475 A1 (Matheson et al.) describe un proceso de purificación de silicio primario con similitudes con el proceso de purificación de Kroll de titanio con breve mención a un proceso de purificación de composición de silicio secundario que implica la fundición en vacío a alta temperatura de una composición de silicio que comprende un silicio dopado con fósforo y boro con pureza de silicio en el intervalo de 99,99 por ciento a 99,9999 por ciento.

15 Generalmente el proceso de CEVAR produce un metal purificado mediante estas cuatro etapas: (1) evaporar impurezas a medida que el electrodo de metal se funde y expone a un vacío en el horno de CEVAR; (2) hacer flotar las impurezas de metal líquido (fundido) que tienen una densidad inferior que el electrodo de metal que se funde; (3) disociar impurezas moleculares por su exposición a plasma de alta energía en la zona de arco entre el extremo inferior del electrodo y la balsa de metal fundido (líquido) encima del lingote que se forma; y (4) segregación por solidificación, que tiene como resultado niveles de impureza en el metal solidificado del lingote que son inferiores para ciertos elementos que los niveles de impureza en el metal líquido adyacente del que se está formando el lingote sólido.

20 En el proceso de CEVAR usual se carga un electrodo de metal a temperatura ambiente en el horno de CEVAR, en el que entonces se crea un vacío. Después se crea un arco de corriente continua (CC) de alta magnitud entre el extremo inferior del electrodo y el crisol refrigerado por agua de CEVAR. El arco provoca que el extremo inferior del electrodo se funda, con lo que el metal fundido cae al crisol de fondo cerrado, donde se solidifica y se enfría, para formar un lingote purificado.

25 A pesar de la capacidad del proceso de CEVAR para purificar diversos metales, no se sabe utilizar el proceso para purificar un metaloide tal como silicio. Como el silicio es un semiconductor y no un metal en su estado relativamente puro (necesita una purificación adicional para los usos finales mencionados anteriormente), tiene una resistividad eléctrica relativamente alta a o cerca de la temperatura ambiente. De hecho, un electrodo de silicio suficientemente puro para que sea candidato para purificación mediante el proceso de CEVAR, tendría una resistencia eléctrica que sería demasiado alta para permitir el paso de una corriente de arco tan alta a cualquier tensión razonable aplicada cuando está a o cerca de temperatura ambiente.

30 El metal del lingote solidificado formado en el proceso de CEVAR convencional inicialmente está a su temperatura de sólido y luego se enfría progresivamente dentro del crisol refrigerado por agua, con los cantos del lingote refrigerándose más rápidamente que el centro debido a la proximidad de los cantos a la pared adyacente refrigerada por agua del crisol. Esto genera esfuerzos en el lingote debido a la contracción térmica diferencial, un proceso que pone la superficie de lingote en tensión y el centro en compresión. Para los metales fundidos usualmente por el proceso de CEVAR esto no es un problema, dado que son relativamente dúctiles, esto es, resistentes a agrietamiento. Sin embargo, en el caso de cualquier proceso de CEVAR convencional que se utiliza para silicio fundido, que es quebradizo en un amplio intervalo de temperaturas, un lingote de este tipo sería propenso a un agrietamiento no deseado.

35 El documento WO2011/099208 describe un método de fusión en vacío de silicio para refinar silicio y que emplea un recinto de horno, un crisol conductor y un soporte para un electrodo de silicio alargado en forma de barra. El documento US5373529 describe un aparato para refundir electrodos de metal consumibles en hornos de arco en vacío.

40 Un objeto de la presente invención es proporcionar aparato y método para purificación de un metaloide tal como silicio que incluye un proceso y un horno de CEVAR.

Según un aspecto de la presente invención se proporciona un método para producir un lingote de silicio a partir de un electrodo de silicio en un proceso de purificación de Refusión por Arco en Vacío de Electrodo Consumible realizado en un crisol de fondo abierto de CEVAR dispuesto en un horno de CEVAR, el método comprende: calentar el electrodo de silicio a una temperatura de calentamiento inferior al punto de fusión del electrodo de silicio y disminuir la resistividad de electrodo, antes de la iniciación del proceso de purificación de CEVAR para formar un electrodo de silicio precalentado que tenga una resistividad que permita la iniciación del proceso de CEVAR; fundir el electrodo de silicio precalentado mediante el proceso de purificación de CEVAR para formación de un lingote de silicio a una temperatura elevada en el fondo abierto del crisol de fondo abierto de CEVAR; pasar el lingote de silicio a la temperatura elevada a través de un sistema de calentamiento adyacente al crisol de fondo abierto de CEVAR; y regular el sistema de calentamiento para proporcionar un ambiente térmico controlado por temperatura para el lingote a la temperatura elevada a medida que el lingote de silicio sale del crisol de fondo abierto de CEVAR para enfriar el lingote de silicio sin agrietamiento.

Según otro aspecto de la presente invención, se proporciona un sistema de horno de Refusión por Arco en Vacío de Electrodo Consumible (CEVAR) para producir un lingote de silicio purificado a partir de un electrodo de silicio, el sistema de horno de CEVAR comprende: un aparato de calentamiento de electrodo de silicio para precalentar el electrodo de silicio para formar un electrodo de silicio precalentado; una cámara de horno de CEVAR hermético a gases; un crisol de fondo abierto de CEVAR para contener una zona de arco de un proceso de purificación de CEVAR que funde el electrodo de silicio precalentado, el crisol de fondo abierto de CEVAR dispuesto en la cámara de horno de CEVAR hermético a gases; un sistema de impulso de electrodo de silicio precalentado para bajar el electrodo de silicio precalentado dentro del crisol de fondo abierto de CEVAR a medida que el extremo inferior del electrodo de silicio precalentado se funde en el proceso de purificación de CEVAR; un aparato de calentamiento de lingote dispuesto adyacente al fondo abierto del crisol de fondo abierto de CEVAR a través del que pasa el lingote de silicio formado en el proceso de purificación de CEVAR; un controlador de calentamiento de lingote para controlar el aparato de calentamiento de lingote para proporcionar un ambiente térmico controlado por temperatura para el lingote de silicio que pasa a través del aparato de calentamiento de lingote; y un sistema de impulso de retirada de lingote para retirar como alternativa el lingote de silicio del crisol de fondo abierto de CEVAR con una tasa de crecimiento vertical del lingote de silicio durante un estado estable del proceso de purificación de CEVAR o elevar el crisol de fondo abierto de CEVAR, el electrodo de silicio precalentado y el aparato de calentamiento de lingote a la tasa de crecimiento vertical del lingote de silicio durante el estado estable del proceso de purificación de CEVAR.

Los aspectos anteriores y otros de la invención se presentan en esta memoria descriptiva y en las reivindicaciones adjuntas.

### Breve descripción de los dibujos

Las figuras, junto con la memoria descriptiva y las reivindicaciones, ilustran uno o más modos no limitativos para poner en práctica la invención. La invención no se limita a la disposición ilustrada y al contenido de los dibujos.

La figura 1 es una vista en sección transversal simplificada de un ejemplo de un sistema de horno de CEVAR de la presente invención.

### Descripción detallada de la invención

En la presente invención para producir un lingote de silicio a partir de un electrodo de silicio en un proceso de purificación de CEVAR, la etapa de proceso inicial es precalentamiento del electrodo de silicio que se va a utilizar en el proceso de CEVAR. La resistividad del silicio cae rápidamente con el aumento de temperatura, por lo que un electrodo de silicio que ha sido precalentado a una temperatura suficientemente alta, mientras permanece por debajo de su temperatura de fusión de modo que está sólido (una condición necesaria para el proceso de fusión CEVAR), permitirá el paso de suficiente corriente de arco para permitir que empiece el proceso de CEVAR. La temperatura de precalentamiento requerida para el electrodo en un proceso de fusión CEVAR particular se puede designar resistividad de proceso de CEVAR determinada por los parámetros de proceso para el proceso de fusión CEVAR particular. Sería necesario que dicha temperatura de precalentamiento fuera al menos varios cientos de grados centígrados. Adicionalmente aumentar la temperatura de precalentamiento del electrodo reduce la caída inicial de tensión en el electrodo, por lo que permite el uso de una fuente de alimentación de menor tensión, menos cara.

El precalentamiento del electrodo se puede conseguir ya sea dentro del horno de CEVAR o externamente. El calentamiento externo, por ejemplo en un horno de resistencia que tiene una atmósfera de vacío o gas inerte (controlada), puede tener como resultado la captación de oxígeno y nitrógeno en la superficie de electrodo a medida que el electrodo se transfiere en aire al horno de CEVAR, con riesgo de aumentar el nivel de impureza del lingote de CEVAR posterior. Opcionalmente se puede proporcionar una cámara cerrada al vacío entre una cámara de horno externa y el horno de CEVAR para establecer un ambiente controlado sin exponer el electrodo al aire durante la transferencia.

A medida que el electrodo calentado se funde en el horno de CEVAR, se puede utilizar el paso de corriente de arco en el proceso de CEVAR para mantener la temperatura del electrodo, o se puede utilizar un sistema de calentamiento auxiliar de electrodo interno al horno de CEVAR para mantener la temperatura del electrodo durante el proceso de CEVAR. En cualquier caso, es ventajoso proporcionar aislamiento térmico dentro del horno de CEVAR alrededor del electrodo para disminuir la energía consumida durante el proceso. Por ejemplo, se puede utilizar un material aislante térmico de fibra de carbono para rodear al menos parcialmente el electrodo en el horno de CEVAR.

En la presente invención, preferiblemente se utiliza un crisol corto de CEVAR (utilizado en el horno de CEVAR) que tiene una altura interior,  $h$ , en algún lugar en el intervalo del diámetro,  $d$ , del lingote que se forma en el crisol; por ejemplo, la altura interior del crisol corto de CEVAR puede ser superior al 60 por ciento del diámetro del lingote de silicio formado e inferior al 120 por ciento del diámetro del lingote de silicio formado. Como alternativa si la sección transversal de la pared interior del crisol corto de CEVAR tiene forma rectangular, la altura interior del crisol es algo en el intervalo de la longitud de un lado rectangular del lingote que se forma en el crisol; por ejemplo, la altura interior de un crisol corto de CEVAR rectangular puede ser superior al 60 por ciento del lado rectangular del lingote de silicio formado e inferior al 120 por ciento del lado rectangular del lingote de silicio formado. En un proceso de CEVAR convencional con un crisol de fondo cerrado, la altura interior del crisol sería muy superior a la altura del lingote descrito, por ejemplo, en la patente de EE. UU. nº 4.131.754 (Roberts).

El proceso de purificación de CEVAR utilizado en la presente invención es generalmente similar al descrito, por ejemplo, en la técnica anterior descrita anteriormente excepto por el precalentamiento del electrodo de silicio utilizado en el proceso de CEVAR y el uso de un crisol de metal corto de CEVAR de fondo abierto, refrigerado por agua, como se describe en esta memoria. Generalmente para la presente invención, durante el proceso de purificación de CEVAR, el electrodo de silicio precalentado se coloca en un crisol corto de fondo abierto de CEVAR dentro del horno de CEVAR que se hace hermético a gases y se crea el vacío o se controla el ambiente de otro modo. Durante el proceso, corriente continua (CC) que fluye a través del electrodo y la masa fundida formada debajo del electrodo establece un arco entre el extremo inferior de electrodo y la parte superior de la masa fundida con la zona de arco permaneciendo dentro de la altura del crisol corto de fondo abierto de CEVAR de modo que un lingote solidificado caliente (a una temperatura elevada por encima de la temperatura ambiente) sale por el fondo del crisol corto de fondo abierto de CEVAR. Además, controlar la refrigeración del lingote solidificado caliente que sale del crisol corto de fondo abierto de CEVAR se realiza, como describe adicionalmente más adelante, para evitar sustancialmente el agrietamiento del lingote solidificado.

El lingote se retira del crisol corto de CEVAR a un sistema calentador que proporciona refrigeración controlada en el intervalo de temperaturas en el que es probable que se agriete el lingote. La tasa de retirada del lingote se hace coincidir esencialmente con la tasa de crecimiento del lingote durante un funcionamiento de estado estable, de modo que la zona de arco y la parte superior del lingote permanezcan dentro del crisol. En una disposición alternativa de la presente invención, el lingote se mantiene estacionario y el crisol, electrodo y el calentador de salida del crisol se elevan juntos, para coincidir esencialmente con la tasa de crecimiento del lingote.

En la puesta en práctica de una realización de la presente invención, se realizan las siguientes etapas de proceso: (1) formar un electrodo a partir de uno o más pedazos de silicio; (2) precalentar el electrodo a una temperatura (a modo de ejemplo y sin limitación, entre 800 y 1200 grados centígrados) a la que se vuelve suficientemente conductor (con una resistividad de proceso de CEVAR) para que pase corriente en una etapa de procesamiento de CEVAR posterior sin excesiva caída de tensión y previniendo el agrietamiento del electrodo; (3) fundir el electrodo mediante un proceso de CEVAR; (4) provocar que el lingote caliente resultante pase a un sistema de calentamiento adyacente al crisol de fondo abierto de CEVAR mientras el lingote está a una temperatura suficientemente elevada para prevenir agrietamiento; y (5) controlar el sistema de calentamiento para prevenir el agrietamiento del lingote de silicio cuando se enfría.

En ejemplos alternativos de la invención, la etapa de proceso de precalentamiento anterior (2) se puede realizar dentro del horno de CEVAR o externa al horno como se ha descrito anteriormente.

En ejemplos alternativos de la invención, la fusión anterior del electrodo puede incluir la etapa de proceso de aislar térmicamente el electrodo mientras se realiza la etapa de fusión.

La figura 1 ilustra un ejemplo de un sistema de horno de CEVAR 10 de la presente invención.

Se forma un circuito de CC entre electrodo 90 y crisol corto de fondo abierto de CEVAR 12 con conductores 92 y 94 que ilustran esquemáticamente la conexión a una FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE CC EXTERNA. El electrodo 94 (típicamente el electrodo de potencial positivo) se conecta eléctricamente a la base 32 (o como alternativa accionador de impulso 34).

En la figura 1 se muestra el sistema de horno de CEVAR 10 en medio proceso (estado estable) de fusión CEVAR con un lingote solidificado caliente 96 parcialmente formado dentro de la altura interior del crisol. Se forma una balsa de metal fundido (líquido) 98 en la parte superior del lingote a medida que caen gotas fundidas de metal del electrodo precalentado 90 a través de la zona de arco AZ. Se proporciona un sistema de calentamiento adyacente al

fondo abierto del crisol corto de fondo abierto de CEVAR, con el sistema de calentamiento proporcionando refrigeración controlada del lingote formado en el crisol para prevenir agrietamiento del lingote. El sistema de calentamiento incluye calentador 22 de lingote que rodea el lingote caliente que sale del crisol de fondo abierto y controlador 24 de calentador de lingote que proporciona un ambiente térmico controlado por temperatura para el lingote a medida que pasa a través del calentador de lingote. El ambiente térmico controlado por temperatura se proporciona para permitir calentamiento conductivo controlado al interior del lingote (a veces denominado como "empapamiento" de calor) y radiación térmica controlada desde las superficies exteriores del lingote a medida que el lingote se enfría de modo que se puede evitar el agrietamiento.

La cámara 11 de horno de CEVAR hermético a gases se ilustra esquemáticamente en la figura 1 con líneas discontinuas e incluye una junta sellada hermética a gas para el accionador de impulso 34, que se describe adicionalmente más adelante.

Se puede proporcionar un sistema de impulso de retirada de lingote para retirar el lingote solidificado con una tasa sustancialmente igual a su tasa de crecimiento vertical durante funcionamiento de proceso de CEVAR de estado estable, de manera que la zona de arco y la parte superior del lingote solidificado permanezcan dentro del crisol, o como alternativa, se puede proporcionar un sistema de impulso que eleve el crisol, electrodo y calentador de lingote mientras el lingote solidificado permanece estacionario. Al principio y el final del proceso de purificación de CEVAR la tasa de retirada de lingote variará debido a parámetros transitorios de arranque y final. Como se muestra en la figura 1 el sistema de impulso de retirada de lingote puede incluir una base 32 sobre la que asienta el fondo del lingote solidificado y un accionador de impulso 34 que controla la tasa de retirada (caída) del lingote desde el crisol en la dirección hacia abajo. La base 32 se puede configurar con un contorno que mejora el contacto con trabado mutuo con el fondo del lingote solidificado. Por ejemplo, como se muestra en la figura 1, la base 32 se configura con una interfaz en cola de milano con el fondo de lingote solidificado 96. Esto es ventajoso si la pared lateral de lingote solidificado desarrolla un contacto de resistencia con la pared lateral interior del crisol corto de fondo abierto de CEVAR dado que el accionador de impulso 34 puede tirar hacia abajo de la base con lingote solidificado trabado en oposición a la resistencia de pared lateral.

Como en un horno de CEVAR convencional, se proporciona un sistema de impulso (no se muestra en la figura) de electrodo para bajar el electrodo de silicio precalentado a medida que se funde su extremo inferior y gotea desde el electrodo durante el proceso de purificación de CEVAR.

A modo de ejemplo y no de limitación, para un electrodo de silicio de 200 cm de largo y 30 cm de diámetro que se va a fundir a 7000 amperios de CC en un proceso de purificación de CEVAR de la presente invención, puede ser deseable limitar la caída de tensión inicial en el electrodo to 5 voltios de CC dado que este es un valor moderado en comparación con la tensión de arco típica de proceso de CEVAR dentro del intervalo de 20 a 40 voltios de CC (como función de la presión dentro del horno de CEVAR). En un ejemplo de este tipo, cálculos convencionales indican que el electrodo de silicio requeriría precalentamiento a una temperatura que tiene como resultado una resistividad de silicio de 2524 micro-ohm-cm (resistividad de proceso de CEVAR) del electrodo. La temperatura necesaria para lograr esta resistividad de proceso de CEVAR dependería de los tipos y niveles de impurezas en el electrodo de silicio utilizado en una aplicación particular de la presente invención con la temperatura aumentando a medida que aumenta la pureza del silicio del electrodo de silicio.

La forma del lingote de silicio formado, y por lo tanto la forma de la pared interior del crisol corto de fondo abierto de CEVAR, puede ser de diversas configuraciones en sección transversal, incluyendo cilíndrica o rectangular, y con o sin un perímetro o diámetro interior que disminuya hacia arriba para facilitar el movimiento hacia abajo del lingote a medida que se forma el lingote sólido caliente.

En algunos ejemplos de la invención, se puede realizar la carga continua del horno de CEVAR con electrodos precalentados de modo que el lingote continuo resultante se forme a partir de una sucesión de múltiples electrodos precalentados. En estos ejemplos, se puede proporcionar un aparato de corte de lingote para cortar secciones del lingote continuo resultante para la retirada de secciones de lingote a medida que continúa el proceso continuo de purificación de CEVAR.

En los ejemplos anteriores de la invención, la palabra "Vacío" en CEVAR significa fundir con cualquier nivel de presión inferior a una atmósfera.

En otros ejemplos de la invención, la fusión se puede realizar ventajosamente a presión atmosférica o incluso superior, en una atmósfera de gas inerte, y dicha "fusión en arco a presión" del silicio está dentro del alcance de la presente invención.

**REIVINDICACIONES**

- 5 1. Un método para producir un lingote de silicio a partir de un electrodo de silicio (90) en un proceso de purificación de Refusión por Arco en Vacío de Electrodo Consumible (Consumable Electrode Vacuum Arc Remelt (CEVAR)) realizado en un crisol de fondo abierto de CEVAR (12) dispuesto en un horno de CEVAR (10), el método comprende:
- calentar el electrodo de silicio (90) a una temperatura de calentamiento inferior al punto de fusión del electrodo de silicio y disminuir la resistividad de electrodo, antes de la iniciación del proceso de purificación de CEVAR para formar un electrodo de silicio precalentado que tenga una resistividad que permita la iniciación del proceso de CEVAR;
- 10 fundir el electrodo de silicio precalentado mediante el proceso de purificación de CEVAR para formación de un lingote de silicio (96) a una temperatura elevada en el fondo abierto del crisol de fondo abierto de CEVAR (12);
- pasar el lingote de silicio (96) a la temperatura elevada a través de un sistema de calentamiento (22, 24) adyacente al crisol de fondo abierto de CEVAR (12); y
- 15 regular el sistema de calentamiento (22, 24) para proporcionar un ambiente térmico controlado por temperatura para el lingote a la temperatura elevada a medida que el lingote de silicio sale del crisol de fondo abierto de CEVAR para enfriar el lingote de silicio sin agrietamiento.
2. Un método según la reivindicación 1, en donde la altura interior del crisol de fondo abierto de CEVAR (12) es al menos el 60 por ciento e inferior al 120 por ciento del diámetro del lingote de silicio formado en el proceso de purificación de CEVAR.
- 20 3. Un método según la reivindicación 1, en donde el calentamiento del electrodo de silicio (90) se realiza en una cámara de calentamiento externa antes de colocar el electrodo de silicio precalentado en el horno de CEVAR y la transferencia del electrodo de silicio precalentado desde la cámara de calentamiento externa al horno de CEVAR se consigue en un ambiente controlado.
4. Un método según la reivindicación 1, en donde el calentamiento del electrodo de silicio (90) se realiza después colocar el electrodo de silicio dentro del horno de CEVAR.
- 25 5. Un método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en donde el calentamiento del electrodo de silicio (90) comprende calentar el electrodo de silicio a la temperatura de calentamiento dentro del intervalo de 800 a 1200 grados centígrados para formar el electrodo de silicio precalentado.
- 30 6. Un método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, que incluye aislar térmicamente el electrodo de silicio precalentado mientras se funde el electrodo de silicio precalentado mediante el proceso de purificación de CEVAR.
7. Un método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en donde un aparato calentador auxiliar se dispone dentro del horno de CEVAR para calentar el electrodo de silicio precalentado durante el proceso de purificación de CEVAR.
- 35 8. Un sistema de horno de Refusión por Arco en Vacío de Electrodo Consumible (CEVAR) para producir un lingote de silicio purificado (96) a partir de un electrodo de silicio (90), el sistema de horno de CEVAR comprende:
- un aparato de calentamiento de electrodo de silicio para precalentar el electrodo de silicio (90) para formar un electrodo de silicio precalentado;
- una cámara (11) de horno de CEVAR hermético a gases;
- 40 un crisol de fondo abierto de CEVAR (12) para contener una zona de arco de un proceso de purificación de CEVAR que funde el electrodo de silicio precalentado (90), el crisol de fondo abierto de CEVAR (12) dispuesto en la cámara (11) de horno de CEVAR hermético a gases;
- un sistema de impulso de electrodo de silicio precalentado para bajar el electrodo de silicio precalentado (90) dentro del crisol de fondo abierto de CEVAR (12) a medida que el extremo inferior del electrodo de silicio precalentado se funde en el proceso de purificación de CEVAR;
- 45 un aparato de calentamiento (22) de lingote dispuesto adyacente al fondo abierto del crisol de fondo abierto de CEVAR (12) a través del que pasa el lingote de silicio formado en el proceso de purificación de CEVAR;

- un controlador de calentamiento (24) de lingote para controlar el aparato de calentamiento (22) de lingote para proporcionar un ambiente térmico controlado por temperatura para el lingote de silicio que pasa a través del aparato de calentamiento de lingote; y
- 5 un sistema de impulso (34) de retirada de lingote para retirar como alternativa el lingote de silicio del crisol de fondo abierto de CEVAR (12) con una tasa de crecimiento vertical del lingote de silicio durante un estado estable del proceso de purificación de CEVAR o elevar el crisol de fondo abierto de CEVAR (12), el electrodo de silicio precalentado (90) y el aparato de calentamiento (22) de lingote a la tasa de crecimiento vertical del lingote de silicio durante el estado estable del proceso de purificación de CEVAR.
- 10 9. Un sistema de horno de CEVAR según la reivindicación 8, en donde la altura interior del crisol de fondo abierto de CEVAR (12) es al menos un 60 por ciento e inferior a un 120 por ciento del diámetro del lingote de silicio formado en el proceso de purificación de CEVAR.
- 15 10. Un sistema de horno de CEVAR según la reivindicación 8 o 9, que incluye un cámara cerrada en vacío conectada entre el aparato de calentamiento de electrodo de silicio y el crisol de fondo abierto de CEVAR en la cámara de horno de CEVAR hermético a gases para prevenir la exposición a aire del electrodo de silicio precalentado durante la transferencia desde el aparato de calentamiento de electrodo de silicio a la cámara de horno de CEVAR hermético a gases.
11. Un sistema de horno de CEVAR según cualquiera de las reivindicaciones 8 a 10, que incluye un calentador auxiliar de electrodo dispuesto dentro de la cámara de horno de CEVAR hermético a gases para calentar el electrodo de silicio precalentado durante el proceso de purificación de CEVAR.
- 20 12. Un sistema de horno de CEVAR según cualquiera de las reivindicaciones 8 a 11, el sistema de impulso de retirada de lingote incluye una base (32) sobre la que asienta el fondo del lingote de silicio y un accionador de impulso (34) conectado a la base para controlar la tasa de retirada del lingote de silicio del crisol de fondo abierto de CEVAR.
- 25 13. Un sistema de horno de CEVAR según la reivindicación 12, la base (32) tiene un contorno para contacto de trabado mutuo con el fondo del lingote de silicio.
14. Un sistema de horno de CEVAR según la reivindicación 12 o 13, que incluye una fuente de alimentación de CC que tiene una primera salida (92) y una segunda salida (94) conectada entre el electrodo de silicio precalentado y la base o accionador de impulso.
- 30 15. Un sistema de horno de CEVAR según cualquiera de las reivindicaciones 12 a 14, el crisol de fondo abierto de CEVAR (12) tiene una pared interior con una sección transversal rectangular, la altura interior del crisol de fondo abierto de CEVAR es al menos un 60 por ciento e inferior a un 120 por ciento de la longitud del lado rectangular del lingote de silicio formado en el proceso de purificación de CEVAR.

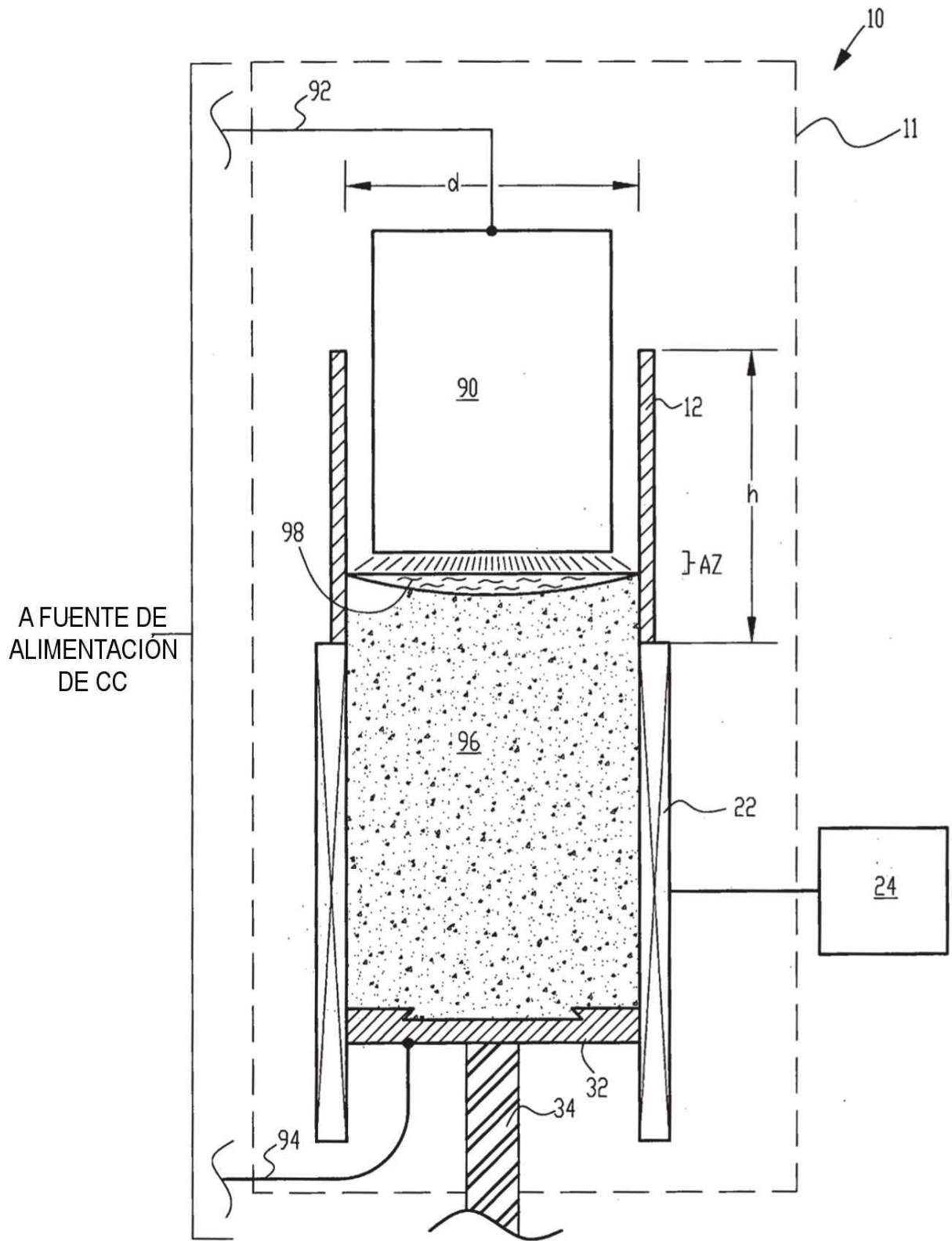


FIG. 1