

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 408 685**

51 Int. Cl.:

C01B 33/035 (2006.01)

H01M 4/96 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.03.2011 E 11156780 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.02.2013 EP 2368847**

54 Título: **Electrodo de grafito**

30 Prioridad:

19.03.2010 DE 102010003064

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

21.06.2013

73 Titular/es:

**WACKER CHEMIE AG (100.0%)
Hanns-Seidel-Platz 4
81737 München, DE**

72 Inventor/es:

**KRAUS, HEINZ y
SOFIN, DR. MIKHAIL**

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 408 685 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

Electrodo de grafito

La invención se refiere a un electrodo de carbono con una derivación de calor mejorada entre el electrodo y la pieza de trabajo.

5 En la industria se emplean electrodos de grafito en muchas aplicaciones diferentes. Ejemplos de ellas son la obtención de aluminio y la obtención de acero, la electrolisis de coladas salinas, la descomposición electrolítica de compuestos químicos, las reacciones de separación química, las soldaduras con arco voltaico, los aparatos de medición y muchos más.

10 Una aplicación importante representa en este caso la separación de polisilicio de acuerdo con el Proceso Siemens, en el que se separa silicio elemental de alta pureza a partir de la fase de gas en la superficie de barras de silicio. En este caso, en un reactor de separación, en la superficie de una barra delgada de silicio calentada de 900 a 1200°C, a partir de una mezcla de hidrógeno y silanos de halógeno o de un compuesto de silicio que contiene hidrógeno, se separa silicio elemental a partir de la fase de gas.

15 Las barras de silicio son retenidas en este caso en el reactor por electrodos especiales que, en general, están constituidos de electrografito de alta pureza. Dos barras delgadas respectivas con diferente polaridad de la tensión en los soportes de fijación de los electrodos están conectadas en el otro extremo de la barra delgada con un puente para formar un circuito cerrado de corriente. A través de los electrodos y sus soportes de fijación de los electrodos se alimenta energía eléctrica para el calentamiento de las barras delgadas. En este caso, el diámetro de las barras delgadas crece. Al mismo tiempo crece el electrodo, comenzando en su punta, en el interior de la pata de las barras de silicio. Después de alcanzar un diámetro teórico deseado de las barras de silicio se termina el proceso de separación, se refrigeran las barras de silicio incandescentes y se desmontan.

20 Aquí adquiere una importancia especial el material y la forma de los electrodos. Por una parte, éstos sirven para el soporte de fijación de las barras delgadas, para la transmisión del flujo de corriente a la barra de silicio, pero también para la transmisión de calor y también como soporte seguro de la barra en crecimiento en el reactor. Puesto que la tendencia va hacia barras cada vez más largas y más pesadas y las parejas de barras, que pueden tener entre tanto más de cien kilos de peso, solamente están amarradas sobre los electrodos en el reactor, es muy importante precisamente la selección de la forma y de la naturaleza del material.

25 También de acuerdo con la utilización posterior de las barras de silicio generadas de esta manera se plantean requerimientos muy diferentes a las barras de silicio y al proceso de separación y, por lo tanto, a los electrodos. Si se utiliza, por ejemplo, el silicio policristalino posteriormente en fragmentos de silicio para aplicaciones solares y para la electrónica, las barras de silicio no pueden desplomarse durante o después del proceso de separación en el reactor de separación. Las barras de silicio policristalino largas y gruesas elevan la rentabilidad del proceso de separación, pero también el riesgo del desplome en el reactor.

30 Los electrodos de acuerdo con el estado de la técnica están constituidos en la parte inferior por un cuerpo de base cilíndrico y en la parte superior por una punta cónica. En la punta cónica está practicada una cavidad para la recepción y contacto de la barra delgada. El extremo inferior del electrodo se coloca en este caso en un soporte metálico de fijación del electrodo, a través del cual se alimenta la corriente. Tales electrodos se conocen, en general y se utilizan, por ejemplo, en el documento US-5.284.640 para la separación de silicio.

35 Como material se emplea principalmente grafito para los electrodos, puesto que el grafito se puede fabricar en pureza muy alta y es químicamente inerte en condiciones de separación. Además, el grafito tiene una resistencia eléctrica específica muy reducida.

40 El documento US-6.639.192 describe un electrodo de grafito con forma convencional. Está constituido por un cuerpo de base cilíndrico con punta de forma cónica. La punta contiene un taladro para la recepción y contacto de la barra delgada. El electrodo está fabricado de una pieza y, por lo tanto, de un material (aquí electrografito) con propiedades homogéneas del material. Tiene especialmente una conductividad térmica específica muy alta. En esta forma de realización es un inconveniente una cuota de fallos alta antes y durante la separación hasta la consecución del diámetro final.

45 El documento DE-2328303 describe un electrodo cilíndrico sin punta. La barra de soporte se extiende en este caso en un taladro sobre superficie plana. Esta forma de los electrodos tiene incluso con diámetro fino de la barra, en virtud de la forma totalmente cilíndrica, una derivación de calor muy alta. Para que las barras no se desplomen en el caso de diámetro fino durante el proceso de separación, el electrodo debe tener una derivación de calor reducida, es decir, debe ser de diámetro pequeño y el material del electrodo debe tener una conductividad térmica específica muy reducida. Las barras gruesas, como son habituales actualmente, no se pueden separar con esta forma del electrodo, puesto que en virtud del diámetro reducido del electrodo y de la conductividad térmica específica baja del material del electrodo, no se puede disipar la energía alta necesaria para diámetros gruesos de las barras a partir de las

patas de las barras.

5 Se conocen electrodos de grafito de varias capas de otros sectores. Pero la disposición de diferentes capas está orientada allí a la optimización de reacciones químicas. Se conoce a partir del documento US-3.676.324, por ejemplo, un electrodo de grafito cilíndrico, que está constituido por una pieza cilíndrica interior y exterior, poseyendo la pieza interior una conductividad eléctrica muy alta y siendo la parte exterior un grafito poroso. El objetivo de esta pluralidad de capas es evitar pérdidas de tensión altas y obtener una reacción química alta en la superficie porosa. Un electrodo similar con dos capas diferentes se conoce a partir del documento GB-2135334, en el que aquí la capa porosa exterior sirve para la obtención electrolítica de flúor.

10 En todos los electrodos conocidos a partir del estado de la técnica es un inconveniente que éstos tienden, en la transición entre el electrodo hacia la barra de silicio o en la barra de silicio en la proximidad del electrodo, más o menos a la formación de grietas o a un reventón del material y, por lo tanto, hacen inestable la barra de silicio.

15 Las cargas fallidas significan un daño económico grande. Así, por ejemplo, en el caso de desplomes de las barras de silicio se producen daños en la pared del reactor. Las barras de silicio desplomadas son contaminadas en este caso a través del contacto con el reactor y deben limpiarse en la superficie. Adicionalmente, las cargas fallidas solamente se pueden desmontar con gasto elevado fuera del reactor. En este caso, se contamina, además, la superficie del silicio.

20 El documento EP 2 161 241 A2 publica un dispositivo para la fabricación de silicio policristalino a través de separación sobre una barra de filamentos, que comprende un electrodo de carbono, que retiene la barra de filamentos, y un soporte de fijación del electrodo, y se refrigera a través de un refrigerante, comprendiendo el electrodo: un elemento de retención de la barra de filamentos, una caperuza calefactora entre el elemento de retención de la barra de filamentos y un soporte de fijación de electrodos, una protección de la caperuza de forma anular, que cubre la caperuza calefactora, y que presenta una abertura hasta el extremo inferior del elemento de retención de la barra de filamentos.

25 El documento EP 0 142 476 A2 publica un electrodo de carbono con una construcción "Compuesta", que está constituida por una parte exterior o una "cáscara" de un primer material (A) y por una zona interior o "núcleo" e un segundo material (B), de manera que se diferencian las propiedades mecánicas y/o térmicas y/o eléctricas del material (A) y del material (B).

30 El documento US 1 444 961 A publica un electrodo con un cuerpo de carbono, que comprende una envolvente de carbono relativamente hermética y esencialmente pura y un núcleo de esta envolvente, que está constituido de material de relleno que contiene carbono relativamente menos hermético y de un aglutinante que contiene carbono, que es un buen conductor de electricidad y un mal conductor de calor.

El cometido de la invención era preparar un electrodo, con el que se reduce claramente la cuota de desplome frente a electrodos de tipo de construcción convencional.

35 Sorprendentemente se ha encontrado que un electrodo que está formado por varias zonas diferentes, que está constituido de materiales con diferentes conductividades térmicas, no posee los inconvenientes conocidos a partir del estado de la técnica.

40 Objeto de la invención es un electrodo de carbono, caracterizado por que el electrodo está constituido por al menos 2 zonas diferentes de diferente conductividad térmica específica, en el que una zona exterior (A) forma la base del electrodo y lleva una o más zonas interiores, en el que la zona interior (B) sobresale por arriba desde la zona (A), presenta la conductividad térmica específica mínima y posee un dispositivo para la recepción de una barra de filamentos.

45 El electrodo de acuerdo con la invención está constituido por al menos 2 partes, una base de electrodo (A) y al menos otra zona interior (B) insertada en esta base. El electrodo puede presentar también todavía otras zonas entre la zona (A) y la zona (B), de manera que la zona más interior recibe y contacta eléctricamente con la barra delgada. Los insertos y la base están constituidos en este caso por al menos 2 materiales diferentes, estando constituido el inserto más interior (zona (B)) el material con la conductividad térmica mínima. Los otros insertos están fabricados de materiales con conductividades térmicas específicas más elevadas, de manera que la conductividad térmica específica se incrementa de una manera ideal desde el interior hacia el exterior.

50 El electrodo de acuerdo con la invención se puede emplear para muchas aplicaciones, en las que se necesitan diferentes conductividades térmicas específicas en el electrodo y sobre su superficie. Con preferencia, el electrodo de acuerdo con la invención se utiliza en la separación de polisilicio.

A través de la división en diferentes zonas de diferentes materiales y diferentes conductividades térmicas, se puede adaptar el electrodo de una manera óptima a los diferentes requerimientos durante el crecimiento del material fijado en él, por ejemplo de una barra de silicio. Al comienzo del crecimiento y, por lo tanto, con diámetros finos de la barra,

la pata de la barra crece en primer lugar solamente sobre el inserto de la conductividad térmica más baja. Debido a la derivación reducida del calor sobre el inserto (zona B) en virtud del grafito utilizado con baja conductividad térmica específica, al comienzo del crecimiento se disipa poco calor sobre todo el electrodo y un soporte de fijación del electrodo y en el caso de diámetros todavía finos de la barra, se obtiene una temperatura alta en la conexión del electrodo con la barra de silicio. No existen zonas más frías en la pata de la barra, en las que pueden aparecer procesos de decapado en virtud de temperatura demasiado baja. La pata de la barra crece, por lo tanto, rápidamente y sin fallos con la punta del electrodo en la zona (B). De esta manera se evita totalmente un desplome en el caso de un diámetro fino de la barra antes o durante el proceso de separación. A medida que avanza el proceso de separación y se incrementa el espesor de las barras, la pata de la barra continúa creciendo a través del inserto (B) sobre la base (A) y dentro de la base. En virtud de la conductividad térmica más elevada de la base, se puede derivar muy bien la energía desde la pata de la barra. El gradiente de temperatura en la pata de la barra y las tensiones térmicas se reducen de esta manera en gran medida. Las grietas y las roturas en la pata de la barra aparecen claramente con menos frecuencia.

Las diferentes zonas del electrodo de acuerdo con la invención pueden ser mecanizadas directamente durante la fabricación del electrodo o pueden estar configuradas como inserto suelo o sustituible. Cuando el electrodo se fabrica de una pieza, la transición de las diferentes zonas y materiales puede ser fluida.

La zona interior (B) está configurada con preferencia en punta hacia arriba y se enchufa con el extremo alejado de la punta en la base. La conexión de la base con el inserto puede tener una forma cónica, cilíndrica u otra forma discrecional. En la práctica ha dado buen resultado una conexión de enchufe cónica, puesto que con una conexión cónica se asegura que la base y el inserto forman una conexión mecánicamente fija y tienen un buen contacto térmico y eléctrico. Entre las zonas A y B se puede insertar también un material adicional para la mejora de la conductividad.

El extremo del inserto, que sobresale desde el electrodo forma la punta del electrodo. Éste posee un dispositivo para la recepción y contacto con la barra delgada. El dispositivo puede tener forma cilíndrica, cónica u otra forma discrecional. De manera correspondiente, el extremo de la barra delgada, empleado posteriormente en el proceso de separación, tiene una forma cilíndrica, cónica u otra forma discrecional adaptada al dispositivo.

Para la recepción y contacto del electrodo de acuerdo con la invención en el reactor de separación se pueden utilizar soportes de fijación de los electrodos discrecionales conocidos a partir del estado de la técnica. Para la mejora de la conductividad térmica de todo el electrodo, el soporte de fijación de los electrodos puede presentar también un cuerpo de refrigeración adicional, que está dispuesto en el extremo inferior de la base y/o se proyecta dentro de la base. Este cuerpo de refrigeración es, en general, un componente del soporte de fijación de los electrodos y está fabricado con preferencia de una pieza con el soporte de fijación de los electrodos. Como materiales son adecuados todos los materiales conocidos de material buen conductor de calor y de electricidad, como por ejemplo metal. El cuerpo de refrigeración es refrigerado con un portador de calor adecuado, por ejemplo agua. Es importante un contacto térmico y eléctrico muy bueno del cuerpo de refrigeración con la base, para que exista alta conductividad eléctrica y térmica y distribuida de una manera uniforme sobre la periferia del inserto. La forma del cuerpo de refrigeración puede ser discrecional, se prefiere una forma cilíndrica o cónica, especialmente preferida es una forma cónica.

A través del electrodo de acuerdo con la invención se podría solucionar en una medida significativa el problema del desplome de las barras en el reactor al mismo tiempo en barras gruesas y en barras delgadas. Las cuotas de desplome durante el proceso de corte tanto con diámetros finos como también con los diámetros finales alcanzados y en el caso de la deposición de las cargas se reducen claramente frente al empleo de electrodos de acuerdo con el estado de la técnica. Casi no se producen reventones en las patas de las barras. Adicionalmente, frente a los electrodos conocidos a partir del estado de la técnica, existe una disipación de calor reducida en las barras de diámetro fino y un comportamiento de crecimiento muy bueno de la pata de la barra sobre el electrodo en barras de diámetro fino. Al mismo tiempo, el electrodo de acuerdo con la invención posee una disipación de calor alta en barras de diámetro grueso.

Como material para el electrodo de acuerdo con la invención se pueden utilizar todos los tipos conocidos de carbono, que son adecuados para el empleo como electrodos. Por razones de pureza, se emplea con preferencia un electrográfico de alta pureza con diferentes conductividades térmicas. Pero también se pueden utilizar otros materiales, como por ejemplo carburo de silicio, materiales compuestos de carbono reforzado con fibras de carbono (CFC), volframio y otros metales de alto punto de fusión. También es posible un recubrimiento del electrodo con materiales, como por ejemplo silicio, carburo de silicio, nitruro de silicio, pirocarbono, carbono de vidrio o siliceno, es decir nano silicio. En este caso se prefiere un espesor de capa inferior a 100 μm .

La conductividad térmica específica del material de grafito utilizado, medida a temperatura ambiente según DIN 51908, de la zona (A) del electrodo de acuerdo con la invención está entre 80 y 200 $\text{W}/(\text{m}^*\text{K})$, con preferencia de 100 a 180 $\text{W}/(\text{m}^*\text{K})$ y de manera especialmente preferida de 130 a 160 $\text{W}/(\text{m}^*\text{K})$. La conductividad térmica específica de la zona interior (B) está entre 20 y 100 $\text{W}/(\text{m}^*\text{K})$, con preferencia entre 30 y 80 $\text{W}/(\text{m}^*\text{K})$, y de manera

ES 2 408 685 T3

especialmente preferida entre 30 y 70 W/(m*K).

5 La resistencia eléctrica específica del material de grafito utilizado de la zona A del electrodo de acuerdo con la invención, medida a temperatura ambiente según DIN 51911, está entre 15 y 5 $\mu\text{Ohm}\cdot\text{m}$, con preferencia entre 10 y 6 $\mu\text{Ohm}\cdot\text{m}$ y de manera especialmente preferida entre 9 y 7 $\mu\text{Ohm}\cdot\text{m}$. La resistencia eléctrica específica de la zona interior B está entre 30 y 10 $\mu\text{Ohm}\cdot\text{m}$, con preferencia entre 25 y 15 $\mu\text{Ohm}\cdot\text{m}$, de manera especialmente preferida entre 25 y 17 $\mu\text{Ohm}\cdot\text{m}$.

10 El valor medio aritmético de la rugosidad superficial Ra del material de grafito utilizado, medido según DIN EN ISO 4287 del electrodo de acuerdo con la invención esta entre 1 y 20 μm , con preferencia entre 1 y 8 μm , de manera especialmente preferida entre 1 y 5 μm con una altura total del perfil de la rugosidad Rt entre 10 y 200 μm , con preferencia entre 10 y 150 μm , de manera especialmente preferida entre 10 y 100 μm y con una profundidad media de la rugosidad Rz entre 8 y 160 μm , de manera preferida entre 8 y 120 μm , de manera especialmente preferida entre 8 y 80 μm ,

La resistencia a la presión del material de grafito utilizado, medida a temperatura ambiente según DIN 51910, está entre 40 y 250 MPa, con preferencia entre 50 y 200 MPa, de manera especialmente preferida entre 50 y 150 MPa.

15 La resistencia a la flexión del material de grafito utilizado, medida a temperatura ambiente según DIN 51902, está entre 10 y 100 MPa, con preferencia entre 15 y 80 MPa, de manera especialmente preferida entre 20 y 70 MPa.

El módulo de elasticidad del material de grafito utilizado, medido a temperatura ambiente según DIN 51915, está entre 1 y 20 GPa, con preferencia entre 2 y 15 GPa, de manera especialmente preferida entre 3 y 15 GPa.

20 El coeficiente de dilatación térmica lineal del material de grafito utilizado de las diferentes zonas está en el intervalo de temperatura de 20 a 1000 °C, medido según DIN 51909, está entre $2\cdot 10^{-6}$ y $10\cdot 10^{-6}$ 1/K, con preferencia entre $3\cdot 10^{-6}$ a $8\cdot 10^{-6}$ 1/K, de manera especialmente preferida entre $3,5\cdot 10^{-6}$ y $7\cdot 10^{-6}$ 1/K.

La porosidad abierta del material de grafito utilizado, medida según DIN 51918, está entre 5 y 25 %, con preferencia entre 10 y 25 %, de manera especialmente preferida entre 10 y 20 %.

25 La figura 1 muestra a modo de ejemplo una forma de realización del electrodo de acuerdo con la invención. La base del electrodo forma la zona (A) configurada como cuerpo redondo (1). En el extremo superior, ésta posee un alojamiento (2) para la zona interior (B), que ha sido representada en la figura a modo de ejemplo con una conexión cónica entre las zonas. La zona superior y el inserto forman conjuntamente un cono común, que forma la punta del electrodo. La punta de la zona interior (B), que sobresale desde la zona exterior (A), posee un alojamiento (3) para una barra de filamentos (6). El electrodo se asienta sobre un porta-electrodos (4), que puede estar configurado
30 opcionalmente todavía con una refrigeración. El cuerpo de refrigeración se puede extender (5) también hasta el interior de la base del electrodo.

La altura de todo el electrodo (L), que está constituida por la zona exterior y la zona interior, está entre 70 y 200 mm, con preferencia entre 70 y 150 mm y de manera especialmente preferida entre 80 y 130 mm. La longitud cilíndrica (L1) está entre 40 y 165 mm, con preferencia entre 45 y 100 mm y de manera especialmente preferida entre 50 y 80 mm. El diámetro del electrodo (D) está entre 30 y 100 mm, con preferencia entre 40 y 80 mm y de manera especialmente preferida entre 45 y 70 mm. El ángulo cónico (α) está entre 15° y 40°, con preferencia entre 20° y 35° y de manera especialmente preferida entre 22° y 32°.

La longitud del inserto (LE) está entre 30 y 90 mm, con preferencia entre 35 y 80 mm y de manera especialmente preferida entre 35 y 65 mm. El diámetro del inserto (D1) está en su lugar más ancho entre 20 y 50 mm, con preferencia entre 25 y 45 mm y de manera especialmente preferida entre 30 y 40 mm. El diámetro del inserto en su extremo inferior (D2) está entre 15 y 40 mm, con preferencia entre 20 y 40 mm y de manera especialmente preferida entre 20 y 35 mm.

El diámetro del cuerpo de refrigeración está en el extremo superior (D3) entre 10 y 60 mm, con preferencia entre 10 y 50 mm y de manera especialmente preferida entre 10 y 45 mm y en el extremo inferior (D4) está entre 10 y 60 mm, con preferencia entre 10 y 50 mm y de manera especialmente preferida entre 10 y 45 mm. La longitud del cuerpo de refrigeración (LK) está entre 20 y 80 mm, con preferencia entre 20 y 60 mm y de manera especialmente preferida entre 30 y 50 mm.

Con la ayuda de los ejemplos siguientes se explica en detalle la invención.

50 En un reactor de separación Siemens se separaron barras de silicio policristalino con un diámetro de 140 a 200 mm. En este caso, se ensayaron varias formas de realización de electrodos. Los parámetros del proceso de separación eran en cada caso iguales en todos los ensayos. Los ensayos solamente se diferenciaban en la forma de realización del electrodo. La temperatura de separación estaba en el ciclo de cargas entre 1000 °C y 1100 °C. Durante el proceso de separación se añadió una alimentación que estaba constituida por uno o varios compuestos de silano

con contenido de cloro de la fórmula $\text{SiH}_n\text{Cl}_{4-n}$ (con $n = 0$ a 4) e hidrógeno como gas portador.

Ejemplo comparativo 1:

5 Para la separación se utilizaron electrodos de acuerdo con el estado de la técnica (figura 2). Los electrodos utilizados estaban constituidos por electrografito de máxima pureza con una conductividad térmica específica de $80 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$. La longitud total (L) era 118 mm y la longitud cilíndrica (L1) era 72 mm . El ángulo cónico (α) era 32° y el diámetro (D) era 65 mm . Se utilizó un electrodo sin cuerpo de refrigeración. Al término de la reacción se abrió el reactor y se anotó el número de las cargas con barras de polisilicio derrumbadas. De 100 cargas de habían derrumbado 20 cargas después de alcanzar el diámetro final.

Ejemplo comparativo 2:

10 Para la separación se utilizaron electrodos de acuerdo con el estado de la técnica (figura 2). Los electrodos utilizados estaban constituidos por electrografito de máxima pureza con una conductividad térmica específica de $150 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$. La longitud total (L) era 118 mm y la longitud cilíndrica (L1) era 72 mm . El ángulo cónico (α) era 32° y el diámetro (D) era 65 mm . Se utilizó un electrodo sin cuerpo de refrigeración. Al término de la reacción se abrió el reactor y se anotó el número de las cargas con barras de polisilicio derrumbadas. De 100 cargas de habían derrumbado 10 cargas antes de alcanzar el diámetro final durante la separación y 2 cargas se habían derrumbado después de alcanzar el diámetro final.

Ejemplo 1:

20 Para la separación se utilizaron electrodos de acuerdo con la invención con inserto y cuerpo de refrigeración (figura 1). La zona (A) de los electrodos utilizados estaba constituida por electrografito de máxima pureza con una conductividad térmica específica de $135 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$. Para la zona interior (B) se utilizó un electrografito de máxima pureza con una conductividad térmica específica de $50 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$. El electrodo tenía la siguiente geometría:

Longitud total (L):	118 mm
Longitud cilíndrica (L1):	72 mm
25 Ángulo cónico (α):	32°
Diámetro (D):	65 mm
Longitud del inserto (LE):	46 mm
Diámetro del inserto (D1):	37 mm
Diámetro del inserto (D2):	22 mm
30 Diámetro del cuerpo de refrigeración (D3):	25 mm
Diámetro del cuerpo de refrigeración (D4):	45 mm
Longitud del cuerpo de refrigeración (LK):	50 mm

35 Al término de la reacción se abrió el reactor y se anotó el número de las cargas con barras de polisilicio derrumbadas. De 100 cargas de habían derrumbado 0 cargas durante la separación antes de alcanzar el diámetro final y 3 cargas se habían derrumbado después de alcanzar el diámetro final.

REIVINDICACIONES

- 5 1.- Electrodo de carbono, caracterizado por que el electrodo está constituido por al menos 2 zonas diferentes de diferente conductividad térmica específica, en el que una zona exterior (A) forma la base del electrodo y lleva una o más zonas interiores, en el que la zona interior (B) sobresale por arriba desde la zona (A), presenta la conductividad térmica específica mínima y posee un dispositivo para la recepción de una barra de filamentos.
- 2.- Electrodo de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por que las diferentes zonas están dispuestas de tal forma que la zona más interior está rodeada total o parcialmente por una zona con conductividad térmica más alta.
- 3.- Electrodo de acuerdo con las reivindicaciones 1 a 2, caracterizado por que la zona interior (B) está configurada como inserto suelto y sustituible.
- 10 4.- Electrodo de acuerdo con la reivindicación 3, caracterizado por que la zona (B) está conectada por medio de una conexión de enchufe cónica en la zona exterior.
- 5.- Electrodo de acuerdo con las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado por que las zonas tienen contacto térmico y eléctrico común.
- 15 6.- Electrodo de acuerdo con las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado por que el electrodo se acopla en su base con un cuerpo de refrigeración.
- 7.- Electrodo de acuerdo con las reivindicaciones 1 a 6, caracterizado por que el electrodo está constituido de electrografito de alta o de máxima pureza con diferentes conductividades térmicas.
- 8.- Electrodo de acuerdo con las reivindicaciones 1 a 7, caracterizado por que el material de carbono utilizado presenta uno o varios de los parámetros siguientes:
- 20 a.) conductividad térmica específica de 20 a 200 W(m*K),
- b.) resistencia eléctrica específica de 30 a 5 $\mu\text{Ohm}\cdot\text{m}$,
- c.) valor medio aritmético de la rugosidad superficial Ra 1 a 20 μm con una altura total del perfil de la rugosidad Rt entre 10 y 200 μm y una profundidad media de la rugosidad Rz entre 8 y 160 μm ,
- d.) resistencia a la presión 40 a 250 MPa,
- 25 e.) resistencia a la flexión 10 a 100 MPa,
- f.) módulo de elasticidad 1 a 20 GPa,
- g.) coeficiente de dilatación térmica lineal en el intervalo de temperaturas de 20 a 1000 °C, $2\cdot 10^{-6}$ a $10\cdot 10^{-6}$ 1/K,
- h.) porosidad abierta 5 a 25 %.
- 30 9.- Procedimiento para la fabricación de silicio policristalino a través de separación de silicio elemental de alta pureza a partir de la fase de gas en la superficie de barras de silicio, caracterizado por que las barras de silicio son retenidas en el reactor por electrodos de acuerdo con una o varias de las reivindicaciones 1 a 8.

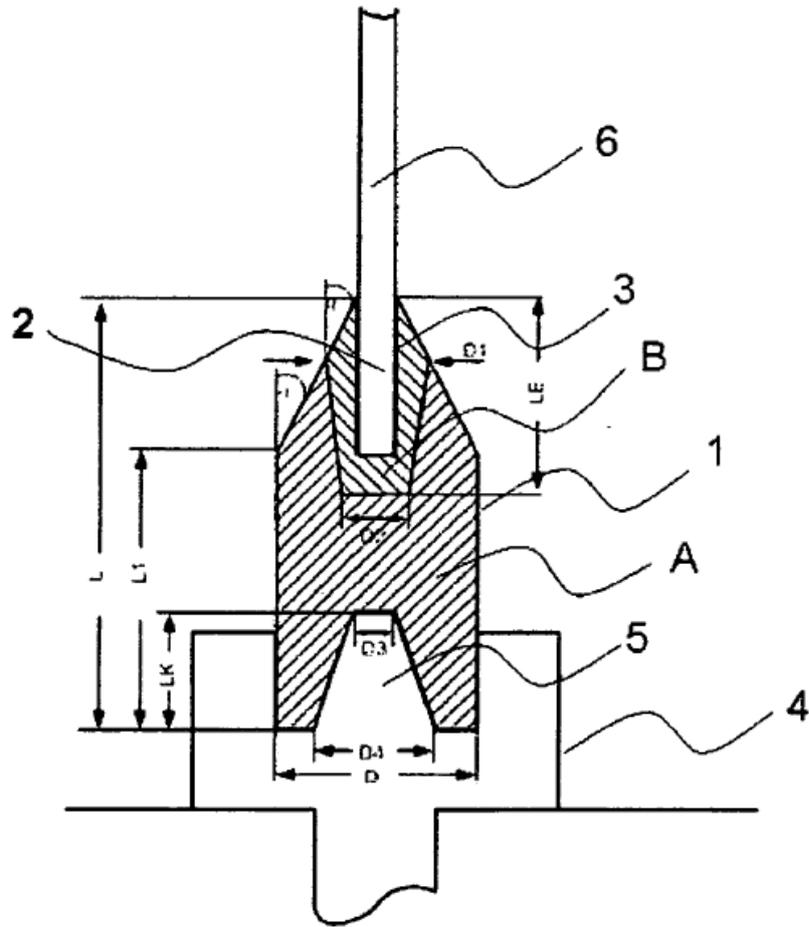


Fig. 1

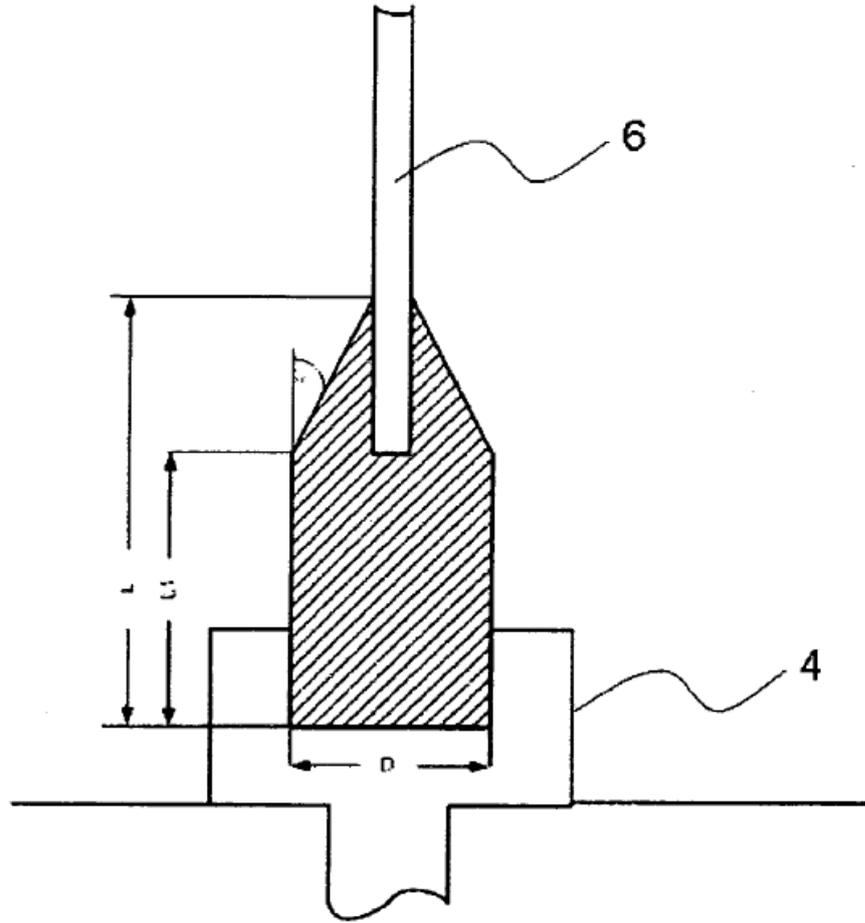


Fig. 2