(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 451 522**

(51) Int. Cl.:

C30B 29/06 (2006.01)
C30B 11/00 (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **19.07.2010 E 10751725 (2)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.12.2013 EP 2456909**

(54) Título: **Aparato para producir lingotes de silicio multicristalino mediante un método de inducción**

(30) Prioridad:

20.07.2009 UA 2009007630

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
27.03.2014

(73) Titular/es:

SOLIN DEVELOPMENT B.V. (100.0%)
Hullenbergweg 369
1101 CR Amsterdam Zuidoost , NL

(72) Inventor/es:

BERINGOV SERGII;
ONISCHENKO,VOLODYMYR;
SHKULKOV, ANATOLY;
CHERPAK, YURIY;
POZIGUN, SERGII;
MARCHENKO, STEPAN y
CHEPURNYY, BOGDAN

(74) Agente/Representante:

MIR PLAJA, Mireia

ES 2 451 522 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

Aparato para producir lingotes de silicio multicristalino mediante un método de inducción

Campo técnico

[0001] La presente invención se refiere a un aparato para producir lingotes de silicio multicristalino mediante el método de inducción, y se puede usar en la fabricación de células solares a partir de silicio multicristalino.

Técnica anterior

[0002] Las células solares que producen electricidad a partir de los rayos del sol se construyen con silicio cristalino, tanto monocristalino como multicristalino, es decir, silicio policristalino consistente en grandes cristales.

[0003] El interés en el silicio multicristalino ha estado en crecimiento constante debido a que la eficiencia de las células solares de silicio multicristalino es próxima a las de las células solares de silicio monocristalino, aunque la productividad de los equipos de crecimiento de silicio multicristalino es varias veces la de los equipos de crecimiento de silicio monocristalino. Además, el crecimiento del silicio multicristalino es más sencillo que el crecimiento del silicio monocristalino.

[0004] En la técnica se conoce un aparato para producir lingotes de silicio multicristalino mediante el método de inducción, comprendiendo dicho aparato una cámara en la que está instalado un crisol refrigerado, envuelto por un inductor, y que tiene un fondo movible y cuatro paredes que constan de secciones separadas entre sí por ranuras que se extienden verticalmente. Se dispone también de un conjunto de medios de calentamiento para la refrigeración controlada del lingote (EP n.º 1754806, publicada el 21 del 2 de 2007, cláusula S30B 11/00) [1]. Además, el aparato está equipado con unos medios de partición independientes con capacidad de ser instalados sobre el lingote cristalizado en el espacio de fusión del crisol refrigerado y de calentar además la carga de silicio en fragmentos, fundiéndose y moldeándose por colada por encima del nivel superior del dispositivo de partición.

[0005] Una desventaja del aparato conocido reside en la baja productividad del silicio multicristalino y la calidad no suficiente del silicio multicristalino obtenido. El silicio multicristalino tiene un número elevado de defectos en la estructura cristalina.

[0006] Un aparato para producir lingotes de silicio multicristalino mediante el método de inducción, fuertemente vinculado a la invención, comprende una caja, que incluye medios para el calentamiento inicial de silicio, un crisol refrigerado envuelto por un inductor y que tiene un fondo movible y cuatro paredes que constan de secciones separadas entre sí por ranuras que se extienden verticalmente, medios para mover el fondo movible, y un compartimento de refrigeración controlada dispuesto debajo del crisol refrigerado, en donde su cara interior define una cámara de fusión de sección transversal rectangular o cuadrada y las paredes del crisol refrigerado se extienden hacia fuera por lo menos desde el inductor en dirección a la porción más baja del crisol refrigerado con el fin de expandir así la cámara de fusión, (EP 0349904, publicada el 10 del 1 de 1990, cláusula B22D 11/10) [2]. El ángulo de expansión de la cámara de fusión está entre 0,4 y 2º.

[0007] Una desventaja del aparato conocido reside en la disminución de la calidad del lingote de silicio multicristalino y la reducción de la productividad de la fabricación de lingotes de silicio multicristalino debido a frecuentes derrames de la masa fundida de silicio.

Exposición de la invención

[0008] La presente invención tiene como objetivo proporcionar un aparato mejorado para la producción de lingotes de silicio multicristalino mediante el método de inducción, en el cual, por medio de cambios estructurales propuestos, se reduce el derrame de masa fundida de silicio para obtener así silicio multicristalino de mejor calidad y para potenciar la productividad del silicio multicristalino.

[0009] Este objetivo se logra proporcionando un aparato para producir lingotes de silicio multicristalino por medio del método de inducción, que comprende una caja, la cual incluye medios para el calentamiento inicial de silicio, un crisol refrigerado envuelto por un inductor y que tiene un fondo movible y cuatro paredes que constan de secciones separadas entre sí por ranuras que se extienden verticalmente, medios para mover el fondo movible, y un compartimento de refrigeración controlada, dispuesto debajo del crisol refrigerado, en donde su cara interior define una cámara de fusión de sección transversal rectangular o cuadrada y las paredes del crisol refrigerado se extienden hacia fuera por lo menos desde el inductor en dirección a la porción más baja del crisol refrigerado para así expandir la cámara de fusión. Según la invención, cada pared del crisol refrigerado tiene una sección central que proporciona la ausencia de una ranura que se extiende verticalmente en la parte central de un lado de la cámara de fusión, y el ángulo β de expansión de la cámara de fusión queda definido por la ecuación

$$\beta = \text{arctg}\ [\ 2 \cdot (k - 1{,}35 \cdot 10^{-3} \cdot b\ )\ /\ d],$$

donde

d es la dimensión del lado más pequeño del rectángulo o del lado del cuadrado de la sección transversal de la cámara de fusión en el nivel del inductor,
b es la dimensión del lado contiguo de la sección transversal de la cámara de fusión en el nivel del inductor,
k es un coeficiente empírico, que está entre 1,5 y 2.

[0010] El coeficiente **k** presenta los valores más altos cuando el perímetro del lingote que se está haciendo crecer es largo.

[0011] La anchura de la sección central de cada pared del crisol de refrigeración está entre 1/6 y 1 de la dimensión del lado de la cámara de fusión.

[0012] En el proceso de fusión y moldeo por colada de silicio mediante fusión por inducción en el fondo del crisol refrigerado con paredes móviles diseñadas como secciones verticales, refrigeradas por agua, de material eléctrica y térmicamente conductor, el menisco formado por parte de la masa fundida es obligado a resaltar por fuerzas electromagnéticas de la superficie interna del crisol y queda equilibrado por su presión hidrostática. Con un suministro continuo del material de partida, el equilibrio se rompe y el nivel inferior del menisco se derrama periódicamente hacia la superficie interna del crisol refrigerado en donde la masa fundida cristaliza y, sobre el perímetro del crisol refrigerado, se forma un acrecimiento de las paredes que sustenta la masa fundida de silicio y evita su contacto con el crisol.

[0013] A medida que el proceso de fusión avanza y el lingote se mueve hacia abajo, el acrecimiento de las paredes se hace más grueso. La temperatura de la superficie exterior del acrecimiento de las paredes que se apoya en el crisol, es inferior al punto de fusión del silicio y depende de su conductividad térmica y de la transferencia de calor a las paredes del crisol, mientras que la superficie interna del acrecimiento de las paredes tiene una temperatura igual al punto de fusión del silicio. El acrecimiento de las paredes así formado tiene un gradiente de temperatura tanto en la sección transversal como en la altura del baño de la masa fundida.

[0014] En la producción de lingotes de silicio multicristalino mediante fusión por inducción, los derrames de masa fundida en el intersticio entre el acrecimiento de las paredes y el crisol refrigerado son debidos a varios factores.

[0015] Uno de los factores está asociado al gradiente transversal de temperatura que cruza el acrecimiento de las paredes.

[0016] Debido al gradiente de temperatura, se produce una contracción térmica del acrecimiento de las paredes. Además, a temperaturas entre 900ºC y 1.050ºC, que son mayores que el punto de fluidez del silicio, el acrecimiento de las paredes experimenta deformación plástica. La magnitud de la contracción térmica del acrecimiento de las paredes depende del gradiente de temperatura y del tamaño y la forma de la cámara de fusión formada por el crisol refrigerado. Cualquier exceso de contracción térmica por encima del valor permitido conduce a una refrigeración inadecuada del acrecimiento de las paredes, a su sobrecalentamiento, a fusión y a derrames en el intersticio entre el acrecimiento de las paredes y la pared interna del crisol refrigerado.

[0017] Otro factor que conduce a derrames de silicio en el intersticio entre el acrecimiento de las paredes y la pared interna del crisol refrigerado se encuentra en la rotura del acrecimiento de las paredes cuando el mismo se agarra a las paredes internas del crisol refrigerado. El silicio líquido no moja el interior de las paredes del crisol refrigerado y no se pega a las paredes cuando no hay defectos en su superficie. Los defectos principales en la superficie de las paredes internas del crisol refrigerado son ranuras verticales entre las secciones de las paredes, siendo necesarias dichas ranuras para que el campo electromagnético del inductor penetre en la masa fundida de silicio y la caliente.

[0018] Se ha establecido experimentalmente que las secciones de paredes separadas entre sí por ranuras verticales y dispuestas en el perímetro de una configuración rectangular o cuadrada para formar cuatro paredes, cada una de ellas con una sección central, que no proporciona ninguna ranura vertical en la parte central de la pared correspondiente del crisol refrigerado, y teniendo en cuenta el tamaño de la cámara de fusión formada por las paredes del crisol refrigerado mientras se expande la cámara de fusión, estabiliza la formación del intersticio como resultado de la contracción térmica del acrecimiento de las paredes en la fusión de silicio por inducción, lo cual proporciona una reducción de los derrames de masa fundida de silicio.

[0019] Por otra parte, la disposición expresada en líneas generales prevé la eliminación del acrecimiento de las paredes que se agarra a la superficie de las paredes del crisol refrigerado, incluyendo áreas con el intersticio más pequeño entre el acrecimiento de las paredes y la superficie de las paredes del crisol refrigerado, y permite tener en cuenta la contracción térmica y las dimensiones transversales de los lingotes obtenidos de silicio multicristalino. Como

consecuencia, los derrames de la masa fundida de silicio se reducen significativamente y el silicio cristaliza bajo condiciones estables a una velocidad constante.

[0020] La mejora de la estabilidad de la fusión y el proceso de cristalización da como resultado la formación de grandes cristalitos que producen silicio multicristalino. Por otra parte, la estabilidad del proceso de cristalización elimina defectos en la estructura cristalina para proporcionar productos de calidad obtenidos a partir de la misma, a saber, células solares.

[0021] De este modo, el diseño propuesto del aparato para producir lingotes de silicio multicristalino proporciona una mayor producción de silicio multicristalino adecuado para la producción de células solares.

Breve descripción de los dibujos

[0022] La invención se describe además en referencia a los siguientes dibujos, aunque sin quedar limitada por ellos, y en los mismos:

la fig. 1 es una vista en sección longitudinal de un aparato para producir lingotes de silicio multicristalino mediante fusión por inducción;

la fig. 2 es una vista en sección longitudinal de un crisol refrigerado que contiene una masa fundida;

la fig. 3 es una vista en sección transversal del crisol refrigerado, que ilustra la cámara de fusión.

Modo óptimo para llevar a la práctica la invención

[0023] Un aparato para producir lingotes de silicio multicristalino mediante fusión por inducción (Fig. 1) incluye una caja 1 que comunica con una tolva 2 de carga. En la caja 1 se dispone de medios 3 para el calentamiento inicial de silicio, un crisol refrigerado 4 circundado por un inductor 5, y un compartimento 6 de refrigeración controlada dispuesto por debajo del crisol refrigerado 4. El crisol refrigerado 4 queda definido por un fondo movible 7 y secciones 8 y secciones centrales 9 (Fig. 3) separadas entre sí por ranuras verticales 10. El fondo movible 7 está asociado a medios 11 para mover el mismo verticalmente dentro del compartimento 6 de refrigeración controlada. Las secciones 8 y las secciones centrales 9 separadas entre sí por ranuras verticales 10 forman cuatro paredes mutuamente perpendiculares 12, 13, 14, y 15. La superficie interna del crisol refrigerado 4 define una cámara 16 de fusión de sección transversal cuadrada o rectangular, en la cual se carga material 17 en fragmentos de silicio. La sección central 9 de cada pared 12, 13, 14 y 15 del crisol refrigerado 4 no proporciona ninguna ranura vertical en la parte central del lado de la cámara 16 de fusión. Las secciones 8 y las secciones centrales 9 de las paredes 12, 13, 14, y 15 del crisol refrigerado 4 (Fig. 2), al formar pendiente hacia fuera, expanden la cámara 16 de fusión por lo menos desde el inductor 5 hacia la porción más baja, o el fondo, del crisol refrigerado 4, y el ángulo β de expansión de la cámara de fusión queda definido por la ecuación:

$$\beta = \mathrm{arctg}\,[\,2 \cdot (\,k - 1{,}35 \cdot 10^{-3} \cdot b\,) / d],$$

donde

d es la dimensión del lado más pequeño del rectángulo o del lado del cuadrado de la sección transversal de la cámara 16 de fusión en el nivel del inductor 5,

b es la dimensión del lado contiguo de la sección transversal de la cámara 16 de fusión en el nivel correspondiente al nivel 5 del inductor,

k es un coeficiente empírico, el cual está entre 1,5 y 2.

[0024] La sección central 9 de cada pared 12, 13, 14 y 15 del crisol refrigerado 4 (Fig. 3) tiene una anchura de entre 1/6 y 1 de la dimensión del lado de la cámara 16 de fusión.

[0025] Las paredes 12, 13, 14, y 15 del crisol refrigerado 4 están conectadas de forma desmontable a un distribuidor 18. El distribuidor 18 proporciona suministro, distribución y dispensación de un líquido refrigerado (agua).

[0026] Las paredes 12, 13, 14, y 15 del crisol refrigerado 4 están constituidas por cobre o una aleación basada en cobre, los medios 3 para el calentamiento inicial de silicio y el fondo movible 7 están constituidos por un material electroconductor tal como grafito.

[0027] El aparato de la invención funciona de la manera siguiente.

[0028] En la caja 1, se crea una atmósfera controlada. El fondo movible 7 se mueve a la parte superior del crisol refrigerado 4 para limitar el espacio 16 de fusión desde por debajo. En la cámara 16 de fusión se adiciona un material 17 en fragmentos de silicio desde la tolva 2 de carga y se introducen los medios 3 para el calentamiento inicial del silicio. El inductor 5 crea el campo electromagnético de alta frecuencia. El fondo movible 7 y los medios 3 para el calentamiento inicial de silicio se calientan en el campo electromagnético del inductor 5, y el material 17 en fragmentos de silicio se calienta debido a la transferencia de calor dentro de la cámara 16 de fusión. Cuando la temperatura alcanza entre 700 y 800ºC, la carga experimenta un calentamiento y fusión por inducción.

[0029] Los medios 3 para el calentamiento inicial de silicio se mueven a partir del campo electromagnético del inductor 5, y, en la cámara 16 de fusión se forma un baño de masa fundida de silicio de acuerdo con la forma de su sección transversal (Fig. 2, fig. 3). Como resultado de la transferencia de calor, la masa fundida de silicio cristaliza y, en la periferia del baño de masa fundida cerca de las paredes del crisol refrigerado 4, se forma un acrecimiento 19 de paredes. Impide que la masa fundida se derrame desde el espacio 16 de fusión y evita la interacción de silicio fundido con las paredes 12, 13, 14, y 15 del crisol refrigerado 4. Debido al campo electromagnético del inductor 5, el baño de masa fundida superior se comprime con respecto a las paredes 12, 13, 14, y 15 del crisol refrigerado 4 y se forma un menisco, y el material 17 en fragmentos de silicio es alimentado continuamente desde la tolva 2 de carga sobre la superficie del menisco. El material 17 de fragmentos de silicio se funde para incrementar la presión hidrostática del menisco. Periódicamente, cuando se altera el equilibrio de presión, la masa fundida se derrama por encima del extremo superior del acrecimiento de las paredes hacia las paredes 12, 13, 14 y, 15 del crisol refrigerado 4, la capa exterior de la masa fundida cristaliza, y el acrecimiento 19 de las paredes crece de forma continua. El fondo movible 7 es movido hacia abajo desde la zona del inductor 5, y la masa fundida de silicio cristaliza continuamente por la porción inferior del mismo para formar un lingote multicristalino 20 a medida que el proceso de fusión y el movimiento descendente del lingote avanzan. El lingote multicristalino 20 se mueve continuamente hacia abajo al compartimento 6 de refrigeración controlada. El lingote multicristalino 20 se extrae a una velocidad tal que el baño de masa fundida permanece relativamente constante en el nivel del inductor 5 y el crisol refrigerado 4, y la masa fundida cristaliza de manera continua en la porción inferior del baño para formar el lingote. En el compartimento 6 de refrigeración controlada, el lingote se refrigera bajo condiciones controladas y se eliminan tensiones térmicas.

[0030] Los lingotes multicristalinos que se obtuvieron en el aparato de la invención presentaban tamaños en sección transversal de 340×340 mm^2 y 340×530 mm^2.

[0031] Se obtuvieron lingotes de tamaño de sección transversal de 340 x 340 mm^2 en la cámara de fusión de una sección transversal cuadrada con una dimensión del lado de 342 mm en el nivel del inductor. La anchura de la sección central del crisol refrigerado era de 60 mm, de modo que había una ausencia de ranura vertical en la parte central del lado de la cámara de fusión. El ángulo β de expansión de la cámara de fusión era:

$$\beta = \text{arctg}\,[2 \cdot (1{,}5 - 1{,}35 \cdot 10^{-3} \cdot 342) / 342] = 0{,}35^{\circ}.$$

[0032] En la producción de lingotes de silicio multicristalino, los derrames de la masa fundida se quedan bastante cortos con respecto a las figuras de la técnica anterior. El derrame producido se detuvo a distancias cortas. Como consecuencia, los lingotes de silicio multicristalino así producido presentaban grandes áreas de silicio monocristalino con cero defectos. La capacidad de producción de silicio multicristalino se incrementó en un 12%.

REIVINDICACIONES

1. Aparato para producir lingotes de silicio multicristalino por medio del método de inducción, que comprende una caja (1), la cual incluye medios (3) para el calentamiento inicial de silicio, un crisol refrigerado (4) envuelto por un inductor (5) y que tiene un fondo movible (7) y cuatro paredes (12, 13, 14, 15) que constan de secciones (8,9) separadas entre sí por ranuras (10) que se extienden verticalmente, medios (11) para mover el fondo movible, y un compartimento (6) de refrigeración controlada, dispuesto debajo del crisol refrigerado, en donde su cara interior define una cámara de fusión de sección transversal rectangular o cuadrada y las paredes del crisol refrigerado se extienden hacia fuera por lo menos desde el inductor en dirección a la porción más baja del crisol refrigerado para así expandir la cámara de fusión, caracterizado porque cada pared del crisol refrigerado tiene una sección central que proporciona la ausencia de una ranura que se extiende verticalmente en la parte central de un lado de la cámara de fusión, y el ángulo β de expansión de la cámara de fusión queda definido por la ecuación

$$\beta = \mathrm{arctg}\,[\,2 \cdot (k - 1{,}35 \cdot 10^{-3} \cdot b\,)\,/\,d],$$

donde

d es la dimensión del lado más pequeño del rectángulo o del lado del cuadrado de la sección transversal de la cámara de fusión en el nivel del inductor,
b es la dimensión del lado contiguo de la sección transversal de la cámara de fusión en el nivel del inductor,
k es un coeficiente empírico, que está entre 1,5 y 2.

2. Aparato según la reivindicación 1, caracterizado porque la sección central de cada pared del crisol refrigerado tiene una anchura de entre 1/6 y 1 de la dimensión del lado de la cámara de fusión.

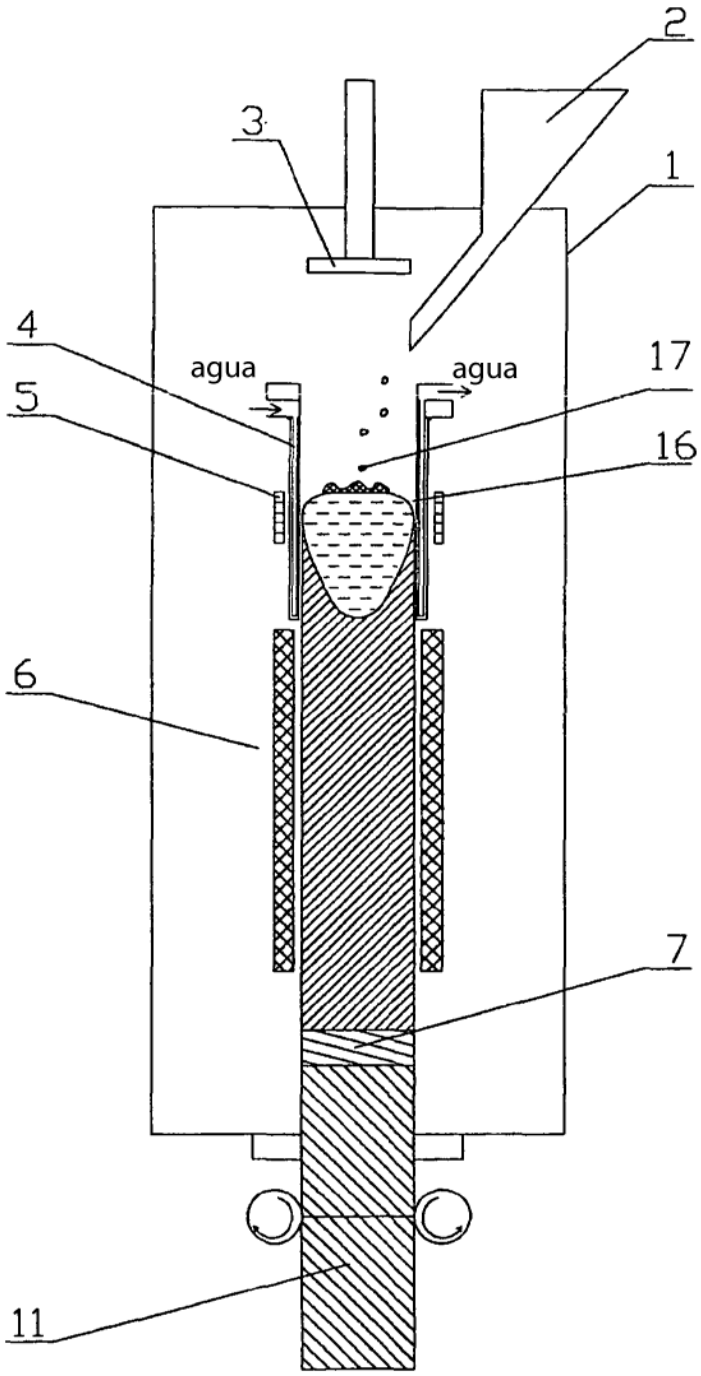

FIG. 1

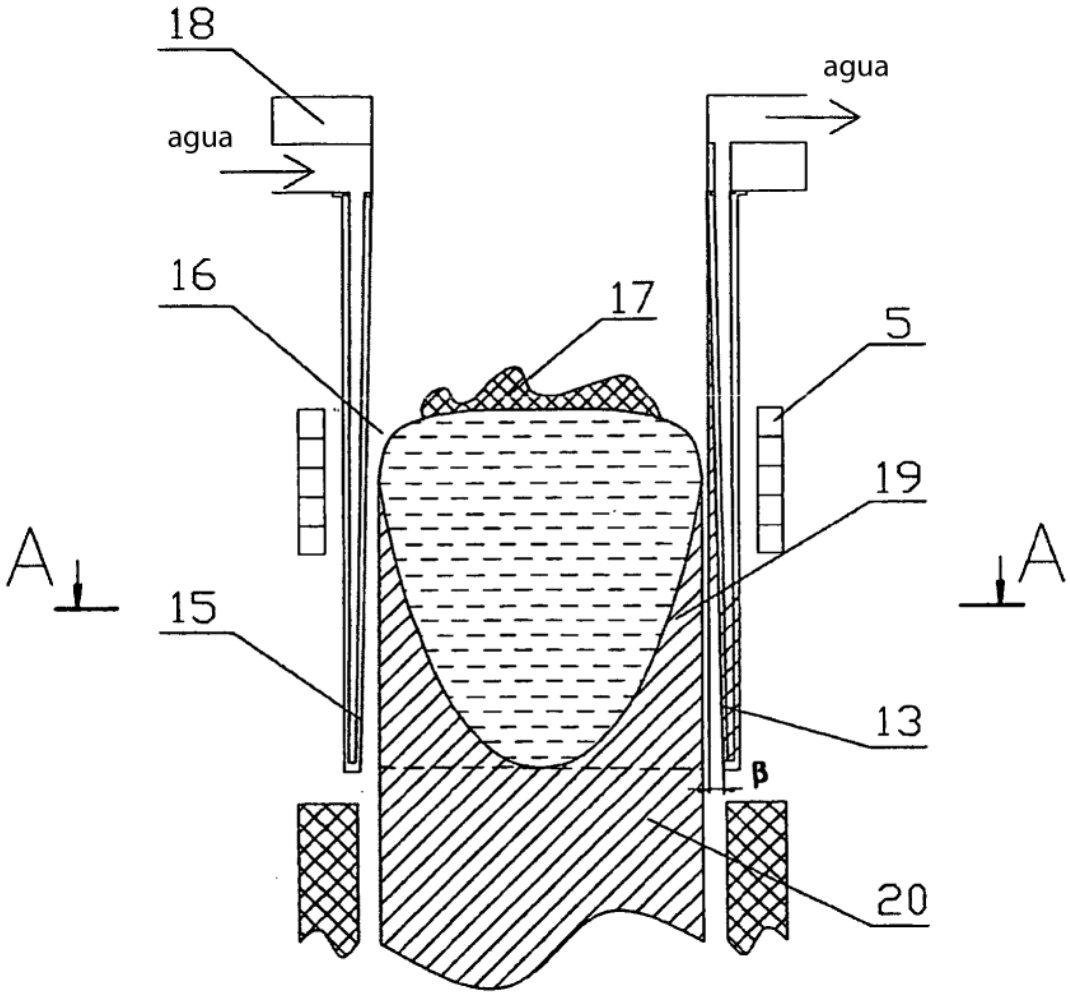

FIG. 2

A – A

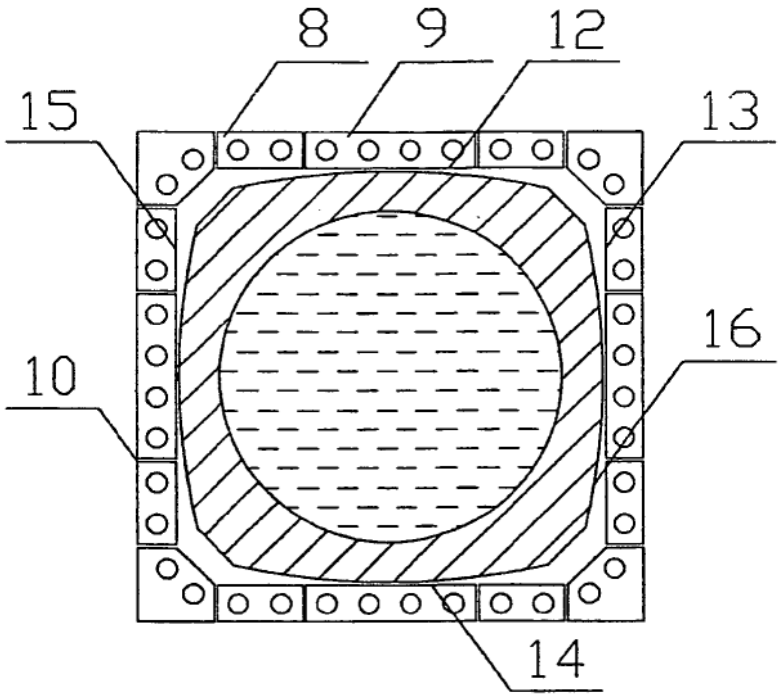

FIG. 3