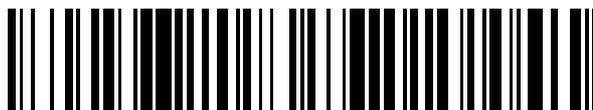


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 566 369**

51 Int. Cl.:

C30B 11/00 (2006.01)

C30B 29/06 (2006.01)

H01L 23/367 (2006.01)

F28F 3/04 (2006.01)

F28F 13/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.11.2011 E 11796938 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.01.2016 EP 2646604**

54 Título: **Intercambiador térmico de un sistema de solidificación y/o de cristalización de un material semiconductor**

30 Prioridad:

29.11.2010 FR 1059867

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

12.04.2016

73 Titular/es:

**COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET
AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES (100.0%)
Bâtiment "Le Ponant D" 25, rue Leblanc
75015 Paris, FR**

72 Inventor/es:

**PIHAN, ETIENNE;
CAMEL, DENIS y
COUDURIER, NICOLAS**

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 2 566 369 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

Intercambiador térmico de un sistema de solidificación y/o de cristalización de un material semiconductor

5 La presente invención se refiere al campo técnico de la solidificación direccional de semiconductores dentro de un crisol o un molde con una extracción de calor por el fondo del crisol o molde. De preferencia, esta se refiere a materiales que tienen un calor latente superior a 10^9 J/m³ y/o una conductividad térmica inferior a 50 W/m.°C en su fase sólida y/o un par material/crisol que tiene una resistencia térmica superior a 0,01 °C.m²/W. Esta se refiere en particular a un intercambiador que permite enfriar un material contenido dentro de un crisol o un molde, en particular un material semiconductor para una aplicación fotovoltaica. Esta se refiere también a un procedimiento de solidificación y/o de cristalización de un material semiconductor que utiliza dicho intercambiador.

15 En los procedimientos de solidificación dirigida en crisol de un material con un alto punto de fusión (> 1.000 °C), por ejemplo en los procedimientos de elaboración de los lingotes multicristalinos de silicio fotovoltaico, la solidificación dirigida se genera mediante un enfriamiento controlado del fondo del crisol. Como se representa en la figura 1, el flujo de calor se extrae, en el estado actual de la técnica, mediante la radiación de un conjunto colocado bajo el crisol (a menudo un conjunto que soporta el crisol). De manera más precisa, el material en fase líquida M_L y fase sólida M_S, esto es parcialmente solidificado de manera direccional, está contenido dentro del crisol Cr que presenta una abertura en la parte superior. El crisol está colocado sobre un conjunto caliente S_R que le sirve eventualmente como soporte mecánico. El conjunto caliente transmite el flujo de calor extraído del material hacia un conjunto frío S_F por medio de un dispositivo que permite controlar el intercambio térmico entre los dos conjuntos caliente y frío. El control del intercambio térmico se hace, por ejemplo, mediante radiación por medio de un elemento F_V que determina la radiación (por un factor de vista). De manera complementaria, el control del intercambio térmico también se puede hacer, por ejemplo, mediante conducción térmica entre los conjuntos caliente y frío.

25 El flujo extraído está limitado en valor superior por el principio de intercambio térmico, por las áreas de las superficies del conjunto caliente S_R y del conjunto frío S_F, por el factor de vista entre el conjunto caliente S_R y el conjunto frío S_F, por las propiedades de los materiales utilizados (conductividad térmica, emisividad) y por las temperaturas de los conjuntos, dichas temperaturas no son independientes de los flujos extraídos. El flujo extraído del material (fase líquida M_L y fase sólida M_S) es en cualquier caso inferior al flujo extraído por el conjunto bajo el crisol.

35 El flujo extraído está limitado en valor inferior bien por un aislamiento cuyos medios de implementación dependen del principio físico utilizado para la extracción (pantalla para la radiación, dejar sin contacto para la conducción), o bien por un aporte de calor mediante el calentamiento del conjunto caliente. En este último caso, el flujo se extrae siempre del conjunto caliente, pero puede anular o minimizar considerablemente el flujo entre el crisol C_R y el conjunto caliente y, por lo tanto, anular o minimizar considerablemente el flujo que sale del material. Todo el protocolo de aplicación de las extracciones de calor consiste en tener:

- 40
- el límite inferior más bajo posible,
 - el límite superior más alto posible, y
 - unas zonas de regulación lo más continuas posibles entre estos dos límites y mediante un medio que se pueda realizar y controlar de manera previsible y reproducible, en el mejor de los supuestos sin consumibles adicionales.

45 Dicho de otro modo, se busca una extracción de calor (o flujo térmico que sale del material) modulable haciendo que varíe el flujo en una gama realizable, lo que eventualmente implica la utilización de crisoles o de materiales particulares para alcanzar los límites de la gama.

50 Todos los sistemas industriales o de laboratorio conocidos y utilizados en el campo de la solidificación dirigida del silicio para aplicaciones fotovoltaicas tienen en común permitir una regulación del flujo de calor extraído a través de un dispositivo dispuesto bajo el crisol, esto es:

- 55
- mediante radiación principalmente:

en este caso, la regulación se hace mediante:

- 60
- o un movimiento de una pantalla (por ejemplo en un dispositivo DSS450HP comercializado por la empresa GT Solar International, Inc.) que define un factor de vista entre una superficie radiante del conjunto caliente y una superficie del conjunto frío,
 - o un movimiento de una superficie radiante del conjunto caliente (por ejemplo en un dispositivo *Heat Exchanger Method* comercializado por la empresa Crystal Systems, Inc.) con respecto a una superficie del conjunto frío, realizándose la radiación por ejemplo a través de una pantalla,
 - o un control de la temperatura del conjunto caliente bajo el crisol mediante el calentamiento (por ejemplo en un dispositivo SCU400 plus o SCU800 plus comercializado por la empresa ALD Vaccum Technologies GmgH) para

un sistema de extracción fijado en condición de extracción en el límite superior, es decir una extracción no modulable regulada por un flujo de calor suministrado bajo el crisol para extraer menos calor del material.

– mediante conducción principalmente:

- 5 en este caso, la regulación se hace mediante:
- un control de la temperatura del conjunto frío bajo el crisol, mediante la inyección de un fluido relativamente más frío dentro de este (por ejemplo en un dispositivo *Helium Cooled Heat Exchanger Method* comercializado por la empresa Crystal System, Inc.)
 - un movimiento que pone en contacto por medio de una resistencia térmica controlable al conjunto caliente con el conjunto frío.

15 En el primer tipo de dispositivo, la variación del flujo se obtiene por la variación de la superficie de intercambio mediante radiación y el flujo máximo está limitado por la superficie máxima de intercambio que es, en el mejor de los casos, cercana a la superficie de la sección horizontal del conjunto caliente.

20 En el segundo tipo de dispositivo, la variación del flujo intercambiado mediante conducción / convección se obtiene en un caso por variación del caudal de un fluido y, en el otro caso, por variación del espesor del gas que separa dos placas conductoras. El flujo máximo está, por tanto, limitado bien por el caudal máximo, la conductividad y la capacidad calorífica del fluido, bien por la resistencia térmica entre las dos placas en contacto, siendo esta el resultado de los inevitables defectos de planicidad de las dos superficies enfrentadas.

25 Los sistemas existentes no permiten tener un flujo máximo suficiente a baja temperatura manteniendo al mismo tiempo un buen aislamiento a alta temperatura. El problema es conseguir mantener una extracción de calor elevada bajo el crisol cuando la altura del material que hay que solidificar es elevada o cuando el crisol es un buen aislante térmico. Dicho de otro modo, el problema consiste en aumentar el flujo de calor que se puede extraer del material que hay que solidificar mientras la temperatura del material es relativamente baja. Por ejemplo, en el caso de lingotes de silicio multicristalino con una altura de entre 20 y 45 cm con un crisol de silicio de 20 mm, el flujo extraído por una superficie simple radiante en la gama 800-1.000 °C es limitado. Esto limita el gradiente térmico y la velocidad de solidificación.

30 Se puede concebir resolver el problema aumentando la superficie radiante del soporte de crisol mediante un simple aumento de las dimensiones de este:

- 35
- Se puede aumentar la superficie radiante de las caras laterales del soporte de crisol con la condición de que la superficie fría sea adecuada. Esto presenta el defecto de localizar la extracción de calor en los lados y de inducir un defecto de homogeneidad. Esta técnica presenta también el defecto de añadir una resistencia térmica mediante conducción a causa del espesor así aumentado del soporte de crisol.
 - 40 • Se puede aumentar la anchura y de este modo la superficie radiante en el fondo del soporte de crisol. Sin embargo, el bloque intercambiador no puede ser mucho más ancho que el crisol y, por lo tanto, que el lingote por el riesgo de penalizar la homogeneidad de la extracción de calor. El factor de aumento de flujo por medio de la superficie aumentada se mantiene, por lo tanto, limitado en esta opción.

45 En los sistemas existentes, la distribución del flujo en la cara inferior del crisol viene impuesta por el método seleccionado para aumentar el flujo, y está por lo tanto directamente ligado al valor de flujo seleccionado. Sin embargo, este parámetro desempeña una función específica en cada una de las etapas del procedimiento (germinación, cristalización, enfriamiento del sólido), de modo que sería ventajoso poder modificar esta distribución a lo largo de las etapas del procedimiento.

50 El objetivo de la invención es proporcionar un intercambiador que permita resolver los problemas mencionados con anterioridad y que mejore los intercambiadores conocidos de la técnica de la técnica anterior. En particular, la invención propone un intercambiador que permite una modulación y/o un control simple y preciso del flujo térmico extraído de un crisol o de un molde, en particular para una aplicación de solidificación y/o de cristalización de un material semiconductor utilizado en el campo de la energía fotovoltaica. Además, la invención propone un procedimiento de solidificación y/o de cristalización que utiliza dicho intercambiador.

55 De acuerdo con la invención, el intercambiador térmico, en particular intercambiador térmico de un sistema de solidificación y/o de cristalización de un material semiconductor, comprende una primera pieza y una segunda pieza, siendo la primera pieza y la segunda pieza desplazables una con respecto a la otra. La primera pieza comprende unos primeros relieves y la segunda pieza comprende unos segundos relieves, estando los primeros relieves destinados a cooperar con los segundos relieves.

60 El intercambiador puede comprender un elemento de desplazamiento de la primera pieza en relación con la segunda pieza que permite controlar o regular un flujo de calor intercambiado, en particular un flujo de calor intercambiado entre la primera pieza y la segunda pieza.

- El elemento de desplazamiento puede comprender un regulador para modular la distancia entre la primera pieza y la segunda pieza en función del flujo de calor intercambiado deseado, es decir en función del flujo de calor que se busca hacer que pase por el intercambiador, esto es extraer de un módulo o crisol de solidificación y/o de cristalización.
- 5 El regulador permite situar la primera pieza y la segunda pieza a al menos dos distancias distintas para obtener al menos dos flujos de calor intercambiados distintos o al menos dos coeficientes de intercambio del intercambiador distintos o dos coeficientes de intercambio distintos.
- 10 El regulador permite hacer que varíe de forma continua la distancia entre las dos piezas entre una primera posición en la que una superficie de intercambio es mínima y una segunda posición en la que la superficie de intercambio es máxima.
- 15 Los primeros relieves pueden comprender unos huecos y unos salientes, y los segundos relieves pueden comprender unos huecos y unos salientes.
- Los pasos de los salientes y de los huecos puede ser variable a lo largo de una dimensión de las piezas primera y segunda.
- 20 La altura de los salientes puede ser variable a lo largo de una dimensión de al menos una de las piezas primera y segunda.
- Los primeros relieves y los segundos relieves pueden cooperar mediante encajamiento de los salientes dentro de los huecos.
- 25 Los primeros relieves pueden presentar unos salientes provistos de flancos inclinados paralelos a unos flancos inclinados de huecos de los segundos relieves.
- 30 Los primeros relieves y los segundos relieves pueden tener unas estructuras paralelepípedicas, en particular unas estructuras dispuestas en un mismo eje longitudinal.
- Los salientes de los primeros relieves pueden estar recubiertos con un primer material que tiene unas características térmicas diferentes del material que constituye el resto de la primera pieza, en particular que tiene unas características aislantes térmicas.
- 35 Los salientes de los segundos relieves pueden estar recubiertos por un segundo material que tiene unas características térmicas diferentes del material que constituye el resto de la segunda pieza, en particular que tiene unas características aislantes térmicas.
- 40 Los materiales de la primera pieza y de la segunda pieza pueden tener unas características térmicas diferentes.
- La primera pieza puede estar destinada a estar térmicamente conectada a un crisol o a un molde y la segunda pieza puede estar destinada a estar térmicamente conectada a una fuente fría.
- 45 El intercambiador puede comprender un primer elemento para crear un espesor de gas modulable entre el crisol y la primera pieza y/o puede comprender un segundo elemento para crear un espesor de gas modulable entre la fuente fría y la segunda pieza.
- 50 Al menos uno de los salientes de la primera pieza y/o de la segunda pieza puede estar dimensionado de modo que entre en contacto con el fondo de los huecos de la segunda pieza y/o de la primera pieza en una posición relativa particular de la primera pieza y de la segunda pieza.
- De acuerdo con la invención, un sistema de solidificación y/o de cristalización de un material semiconductor comprende un intercambiador definido con anterioridad.
- 55 De acuerdo con la invención, un procedimiento de solidificación y/o de cristalización de un material semiconductor utiliza un intercambiador definido con anterioridad y comprende:
- 60 – una etapa de posicionamiento de la primera pieza en relación con la segunda pieza, y
– una etapa de transferencia térmica del crisol a la fuente fría, por medio de la primera pieza y de la segunda pieza del intercambiador.
- La etapa de posicionamiento se puede realizar durante la etapa de transferencia térmica.

Se puede hacer que varíe el coeficiente de intercambio del intercambiador entre el inicio y el fin de la solidificación y/o cristalización. Para ello, se puede hacer que varíe la posición relativa de las dos piezas durante la solidificación y/o la cristalización.

5 Los dibujos adjuntos representan, a título de ejemplo, diferentes formas de ejecución de un intercambiador de acuerdo con la invención.

La figura 1 es un esquema de un intercambiador conocido de la técnica anterior.

10 La figura 2 es un esquema de una primera forma de realización de un intercambiador de acuerdo con la invención.

La figura 3 es un esquema de detalle de la primera forma de realización de un intercambiador de acuerdo con la invención, representándose el intercambiador en dos configuraciones.

15 La figura 4 es un gráfico que ilustra las evoluciones de la temperatura bajo un crisol en función de la altura de los salientes de la primera pieza y de la segunda pieza.

La figura 5 es un gráfico que ilustra las evoluciones de la temperatura bajo un crisol en función de la relación entre el área de las superficies de las secciones rectas de los salientes de la segunda pieza y el área de las superficies de las secciones rectas de los salientes de la primera pieza, para cuatro valores de flujos térmicos dados.

20 La figura 6 es un esquema de una segunda forma de realización de un intercambiador de acuerdo con la invención.

La figura 7 es un gráfico que ilustra las evoluciones del flujo térmico transferido por medio de un intercambiador de acuerdo con la invención en función de las posiciones relativas de la primera pieza y de la segunda pieza, para siete valores de temperatura de crisol dados.

25 La figura 8 es un gráfico que ilustra las evoluciones del flujo térmico máximo transferido por medio de un intercambiador de acuerdo con la invención y por medio de un intercambiador conocido de la técnica anterior en función de una temperatura de crisol.

30 La figura 9 es un gráfico que ilustra las evoluciones del flujo térmico mínimo transferido por medio de un intercambiador de acuerdo con la invención y por medio de un intercambiador conocido de la técnica anterior en función de una temperatura de crisol.

35 La figura 10 es un gráfico que ilustra las evoluciones de la amplitud del coeficiente de intercambio permitida por un intercambiador de acuerdo con la invención en función de una temperatura de crisol.

40 La figura 11 es un esquema de una tercera forma de realización de un intercambiador de acuerdo con la invención.

La figura 12 es un esquema de una quinta forma de realización de un intercambiador de acuerdo con la invención.

La figura 13 es un esquema de una sexta forma de realización de un intercambiador de acuerdo con la invención.

45 La figura 14 es un esquema de una séptima forma de realización de un intercambiador de acuerdo con la invención.

La figura 15 es un esquema de una octava forma de realización de un intercambiador de acuerdo con la invención.

50 La figura 16 es un esquema de una novena forma de realización de un intercambiador de acuerdo con la invención.

La figura 17 es un esquema de una décima forma de realización de un intercambiador de acuerdo con la invención.

55 La figura 18 es un esquema de una duodécima forma de realización de un intercambiador de acuerdo con la invención.

La figura 19 es un esquema de una decimotercera forma de realización de un intercambiador de acuerdo con la invención.

60 A continuación se describe una primera forma de realización de intercambiador térmico 1 representado en la figura 2. Con este se equipa, por ejemplo, un sistema de solidificación y/o de cristalización de un material semiconductor, en particular de un material semiconductor fotovoltaico. El sistema de solidificación y/o de cristalización forma, por ejemplo, parte de un horno.

65 El sistema de solidificación y/o de cristalización comprende un crisol 4 (o molde) destinado a contener el material 6, 7 que hay que solidificar y/o que cristalizar, una fuente fría 5 destinada a enfriar el crisol y un intercambiador 1

destinado a regular el flujo térmico transferido del crisol a la fuente fría. El material puede presentar una fase líquida 7 y una fase sólida 6.

5 El intercambiador comprende una primera pieza 2 y una segunda pieza 3. El intercambiador comprende también un medio o elemento de desplazamiento de la primera pieza en relación con la segunda pieza. La primera pieza comprende unos primeros relieves 21 y la segunda pieza comprende unos segundos relieves 31. Los primeros relieves están destinados a cooperar con los segundos relieves. De preferencia, los primeros relieves y los segundos relieves cooperan mediante encajamiento. Por ejemplo, los primeros relieves y los segundos relieves pueden ser complementarios.

10 En una primera posición relativa de la primera pieza y de la segunda pieza, el intercambiador presenta un primer coeficiente de intercambio y en una segunda posición relativa de la primera pieza y de la segunda pieza, el intercambiador presenta un segundo coeficiente de intercambio, diferente del primer coeficiente de intercambio. En efecto, entre las dos posiciones relativas, las áreas de las superficies enfrentadas de la primera pieza y de la segunda pieza son diferentes, de lo que se deriva que el coeficiente de intercambio es diferente. En particular, las áreas de las superficies enfrentadas de la primera pieza y de la segunda pieza son diferentes por que las áreas de las superficies laterales de los salientes enfrentados son diferentes.

15 El elemento 9 de desplazamiento permite desplazar, en particular en traslación, la primera pieza y la segunda pieza una con respecto a la otra. Este elemento comprende un actuador 91.

El intercambiador de acuerdo con la invención permite controlar el flujo de calor extraído del crisol o del molde.

20 Como se ha visto con anterioridad, el elemento de desplazamiento de la primera pieza en relación con la segunda pieza permite controlar o regular el flujo de calor intercambiado, en particular un flujo de calor intercambiado entre la primera pieza y la segunda pieza, en particular regulando el coeficiente de transferencia térmica del intercambiador.

25 De preferencia, el elemento de desplazamiento comprende un regulador 92 que permite modular la distancia entre la primera pieza y la segunda pieza en función del flujo de calor intercambiado deseado, es decir en función del flujo de calor que se busca hacer que pase por el intercambiador, esto es extraer de un molde o crisol de solidificación y/o de cristalización. De preferencia, el regulador controla o dirige el actuador que posiciona la primera pieza y la segunda pieza una con respecto a la otra. En función de un flujo de calor intercambiado deseado en el intercambiador o en función de un coeficiente de intercambio deseado, el regulador determina una orden y envía esta orden al actuador. Al ejecutar esta orden, el actuador posiciona la primera pieza y la segunda pieza de forma adecuada para alcanzar el flujo de calor intercambiado deseado en el intercambiador o el coeficiente de intercambio deseado.

30 El regulador puede comprender unos elementos de regulación que permiten implementar una regulación en circuito abierto o una regulación en circuito cerrado.

35 El regulador permite hacer que varíe de forma continua la distancia entre las dos piezas entre una primera posición en la que una superficie de intercambio es mínima y una segunda posición en la que la superficie de intercambio es máxima.

40 El intercambiador permite ampliar la gama de valor superior de flujo térmico, que se puede extraer del material por medio del crisol o el molde, más allá de los límites de los sistemas actuales. Al ampliar esta gama, se pueden aumentar los rendimientos de material y la productividad por medio de la altura de lingotes solidificados y/o las velocidades de solidificación. También se puede aumentar algunos criterios de calidad seleccionando, con una velocidad y altura de cristalización idénticas, aumentar el gradiente térmico en el material y de este modo controlar la relación entre velocidad de cristalización/gradiente térmico en la interfaz sólido-líquido en una gama más extensa.

45 En particular, el intercambiador térmico de acuerdo con la invención permite extraer el calor de un material que hay que solidificar, en particular extraer el calor del material durante su cristalización en lingote a alta temperatura. El intercambiador térmico permite:

50 - hacer que varíe el coeficiente de intercambio del intercambiador entre el inicio y el final de la cristalización (por ejemplo para el silicio entre 1.400 °C y 600 °C para la temperatura de la primera pieza). A alta temperatura, la radiación genera naturalmente unos flujos de calor elevados: el intercambiador se pone entonces en una posición tal que el coeficiente de intercambio es bajo (por ejemplo inferior a $30 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$) alejando la primera pieza y la segunda pieza. A la inversa, a baja temperatura, la radiación genera unos flujos muy bajos. El intercambiador se pone en una posición tal que el coeficiente de intercambio es importante (por ejemplo superior a $60 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$) acercando la primera pieza y la segunda pieza. De este modo, el flujo térmico extraído se puede mantener lo más constante posible.

65 - seleccionar la distribución espacial del coeficiente de intercambio del intercambiador.

Para ello:

- el intercambiador comprende una primera pieza (pieza caliente) en conexión térmica con el crisol o el molde y una segunda pieza (pieza fría) en conexión térmica con una fuente fría como una caja de agua,
- se realizan unas huellas o relieves complementarios, en particular con unas formas complejas, en las caras enfrentadas de la primera pieza y de la segunda pieza. La geometría de estas huellas se puede caracterizar por sus superficies desarrolladas y/o su distribución espacial y/o su profundidad,
- un movimiento relativo de la primera pieza y de la segunda pieza permite hacer que varíe de forma continua la superficie de intercambio entre las dos piezas, entre una posición aislante en la que la superficie de intercambio es mínima (piezas separadas) y una posición conductora en la que esta superficie es máxima (piezas encajadas una dentro de otra),
- de forma opcional, cada una de las piezas primera y segunda está compuesta por dos tipos de materiales que permiten responder a las funciones aislantes y conductoras. Esta hibridación permite reforzar todas las propiedades del intercambiador enumeradas con anterioridad,
- de forma opcional, la segunda pieza puede estar separada de la fuente fría de modo que refuerce la función de aislamiento o la primera pieza puede estar separada del crisol de modo que refuerce la función de aislamiento.

La realización de huellas o relieves complementarios en dos caras enfrentadas de la primera pieza y de la segunda pieza y el desplazamiento relativo de la primera pieza y de la segunda pieza permiten, como se ilustra en la figura 3, realizar una superficie de intercambio que tiene un área significativamente superior al área de una sección recta horizontal de una de las piezas primera y segunda. La relación entre estas áreas puede, por ejemplo, ser de 1 a 10.

Este concepto permite hacer que varíe el flujo intercambiado mediante radiación hasta unos valores manifiestamente más grandes que en los dispositivos conocidos. Además, permite añadir una contribución de intercambio mediante conducción/convección en el gas que se encuentra entre la primera pieza y la segunda pieza. Esta contribución es regulable mediante la elección de las holguras entre las caras enfrentadas de la primera pieza y de la segunda pieza. La gama de flujo accesible se puede ajustar mediante la elección de la geometría, el flujo máximo extraído mediante radiación que depende de la superficie máxima de intercambio y la contribución del intercambio mediante conducción que depende además del espesor de las holguras entre las superficies enfrentadas de la primera pieza y de la segunda pieza y de la conductividad térmica del gas entre la primera pieza y la segunda pieza. Esta gama se puede ajustar también mediante la elección de la naturaleza de los materiales enfrentados de la primera pieza y de la segunda pieza, de modo que se adapte su conductividad térmica y su emisividad, así como el de la naturaleza del gas que llena el espacio entre estas superficies. Las piezas también pueden estar constituidas por una combinación de materiales diferentes. De este modo, se realiza mediante un simple desplazamiento relativo de las dos piezas enfrentadas, un aumento controlado, hasta un factor que puede sobrepasar 10, del flujo extraído a una temperatura dada de la primera pieza. El flujo máximo puede, por lo tanto, ser superior hasta un factor 10 al extraído en las condiciones habituales de intercambio mediante radiación entre dos piezas que presentan unas caras planas. Este factor puede entonces verse enormemente aumentado colocándose en unas condiciones (holgura y naturaleza del gas) para las que la contribución del intercambio mediante conducción/convección a través de la película de gas restante entre la primera pieza y la segunda pieza es importante.

Para alcanzar los flujos máximos considerados, la geometría de la huella o relieve debe, de preferencia, responder a unos criterios precisos:

- si los salientes (por ejemplo unos picos) son demasiado largos, se aumenta la resistencia térmica dada la longitud del material, y si los salientes son demasiado cortos, se aumenta poco el área de la superficie de intercambio con respecto al área de la superficie S0 de intercambio entre dos piezas planas. Como se representa en la figura 4, la altura óptima de los salientes varía en función del flujo térmico deseado. Cuanto más grande es este flujo, más pequeña es la altura óptima de los salientes, ya que las pérdidas de calor causadas por la resistencia térmica de los salientes aumentan igualmente.
- otro límite de esta arquitectura lo constituye la proporción del área de la superficie horizontal de los salientes conductores de la primera pieza con respecto al área de la superficie horizontal de los salientes conductores de la segunda pieza. Cada configuración (en función de la altura de los salientes, del flujo deseado...) presenta su situación óptima. Sin embargo, se prefiere una mayor superficie de saliente en la primera pieza para permitir tener una temperatura lo más alta posible, con respecto a la temperatura de los salientes de la segunda pieza, con el fin de tener un intercambio por radiación más fácil, como se ilustra en la figura 5.

De acuerdo con los flujos mínimos considerados en la posición aislante, puede resultar útil separar la segunda pieza de la fuente fría para crear una resistencia térmica entre estos dos elementos: de este modo el valor del mínimo se puede reducir (por ejemplo para obtener un coeficiente inferior a $30 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$).

Como se representa en la figura 6, en una segunda forma de realización, el intercambiador es tal que comprende una primera pieza 2a y una segunda pieza 3a que tienen unos salientes en un material conductor y cuyos extremos están revestidos con un material aislante 24, 34. De este modo, en la posición en la que los aislantes de la primera pieza y de la segunda pieza están enfrentados (representada por el esquema superior izquierdo de la figura 6), la

primera pieza y la segunda pieza están separadas por una capa continua o sustancialmente continua de material aislante.

5 Las caras conductoras laterales de los salientes quedan enfrentadas mediante un movimiento relativo de la primera pieza y de la segunda pieza, como se representa en el esquema superior del centro de la figura 6, y, en mayor medida, como se representa en el esquema superior de la derecha de la figura 6.

La implementación de dicho intercambiador compuesto a una alta temperatura presenta dificultades tecnológicas.

10 En efecto, las dilataciones térmicas y las holguras mecánicas pueden plantear un problema durante el desplazamiento de la primera pieza y de la segunda pieza una con respecto a la otra, en particular en traslación. Además, podrían producirse contactos entre los salientes, lo que podría generar fuertes fenómenos de transferencias locales que pueden dañar el intercambiador. Por último, no resulta fácil disponer un material aislante sobre los salientes.

15 Además, el intercambiador de acuerdo con la invención puede permitir hacer que varíe, según las necesidades, la distribución espacial del flujo térmico extraído, esto es transferido del crisol 4 o molde a la fuente fría 5. Esto se puede obtener mediante la realización de relieves no uniformes a lo largo de las superficies de la primera pieza y de la segunda pieza, es decir haciendo que varíe la anchura y la altura de los salientes. Esto ofrece la posibilidad de realizar una amplia variedad de distribuciones espaciales del flujo térmico y, además, hacer que varíe esta distribución en función del desplazamiento relativo de la primera pieza y de la segunda pieza, como se ilustra en las siguientes formas de realización.

20 Se han obtenido los siguientes resultados experimentales con un intercambiador que tiene una forma de revolución, que consta de 7 salientes con una altura de 65 mm (15 mm de material aislante sobre 50 mm de material conductor). El espesor de los salientes es de 9 mm y el espesor de gas entre los picos es de 1,5 mm. El gas contenido dentro del horno es argón. La fuente fría 5 es una caja de agua de cobre de 160 mm de diámetro. Esta utiliza agua a una temperatura de 28 °C para el enfriamiento. El crisol 4 es de cuarzo con un diámetro de 160 mm y contenía el equivalente de 5 kg de silicio. Unos termopares están situados bajo una placa, en particular de grafito, con un espesor de 3 mm situado bajo el crisol.

25 La figura 7 representa el flujo extraído en función de la posición de la fuente fría y, por lo tanto, de la posición relativa de la primera pieza y de la segunda pieza. Cuanto más alta es la posición de la caja de agua, más imbricadas están la primera pieza y la segunda pieza, y más grande es la superficie de intercambio enfrentada.

35 Se observan tres comportamientos en este gráfico:

- $z < 15$ mm: Una primera parte en la que el material aislante en los extremos de los salientes está enfrentado con el material conductor de los salientes. El flujo térmico aumenta de forma proporcional al desplazamiento.
- 40 • $15 \text{ mm} < z < 32$ mm: Una segunda parte en la que el material conductor de los diferentes salientes queda enfrentado. El aumento del flujo en función del desplazamiento de la primera pieza en relación con la segunda pieza es más grande.
- $z > 32$ mm: Una última parte en la que el flujo térmico se estanca con respecto al desplazamiento. Esto se puede explicar por las diferentes resistencias de contacto presentes en las interfaces (fuente fría/segunda pieza, primera pieza/placa crisol) que limitan el flujo total que se puede extraer del crisol a la fuente fría. Estas resistencias de contacto son tan grandes que, aunque se reduce significativamente la resistencia térmica entre la primera pieza y la segunda pieza, la resistencia térmica total del sistema se estanca. De este modo, para controlar el flujo térmico (en caso de contacto entre dos salientes a causa de una deformación, por ejemplo), las resistencias de contacto son una muy buena alternativa.

50 La figura 8 representa la evolución del flujo térmico máximo para diferentes superficies de intercambio comparado con el flujo térmico máximo que se puede extraer mediante un sistema que presenta unas superficies planas enfrentadas, llevando el área de la superficie enfrentada de dicho sistema la referencia S_0 .

55 Los flujos térmicos mínimos obtenidos para estos mismos modelos se comparan en la figura 9. El modelo que tiene un área de superficie de intercambio de $4xS_0$ tiene el flujo máximo más elevado. Solo posee una única capa de material sobre los salientes. Su aislamiento es ligeramente menos bueno que el del modelo cuya área de la superficie de intercambio es de $3xS_0$. Este modelo posee una capa de un material aislante sobre cada uno de los salientes. El área de la superficie de intercambio enfrentada para estos dos modelos cuando el sistema está colocado en la posición aislante es de aproximadamente dos veces más pequeño que S_0 , de lo que se deriva una gran resistencia térmica. Por último, el flujo térmico mínimo del modelo con una superficie S_0 es el mismo que su flujo térmico máximo, no presentando este intercambiador una superficie de intercambio modulable.

60 La figura 10 representa toda la extensión de los coeficientes de intercambio Al y, por lo tanto, la extensión de los flujos térmicos que se puede obtener con un intercambiador de acuerdo con la invención.

65

En una tercera forma de realización representada en la figura 11, la primera pieza 2b y la segunda pieza 3b pueden tener unas secciones horizontales circulares o cuadradas. De manera alternativa, una de las piezas primera y segunda puede tener una sección circular, mientras que la otra de las piezas primera y segunda puede tener una sección cuadrada.

5 En una cuarta forma de realización (no representada), la geometría de los relieves está adaptada para obtener un aumento deseado del área de la superficie de intercambio en un espacio dado. Para ello, se puede, para aumentar las áreas de las superficies de intercambio, minimizar las dimensiones laterales de los relieves y aumentar su altura. Los relieves pueden, en particular, comprender una red de picos, de barras, de tubos, de conos, de placas con rebordes o de tubos con rebordes. Para una pequeña altura disponible, resulta interesante reducir la dimensión lateral de los relieves y/o pasar de las configuraciones rectangulares a unas configuraciones circulares.

10 Una geometría muy eficaz comprende una red de picos cilíndricos que cooperan con unos orificios circulares. De modo que se conserve, por otra parte, la mejor conductancia posible, en cada una de las dos piezas, es conveniente que el área de la sección de los picos sea de aproximadamente la mitad del área de la sección total de la primera pieza o de la segunda pieza S. El factor máximo de aumento de la superficie de intercambio S_{tot}/S es entonces de $1+2A/d$ donde D es el diámetro de los picos y A su altura.

15 Para una geometría de relieve que comprende una nervaduras que cooperan con unas ranuras, en particular unas nervaduras paralelas que cooperan con unas ranuras paralelas, este factor es $1+A/d$ donde d es la anchura de las nervaduras y A su altura.

20 En una quinta forma de realización representada en la figura 12, la geometría de los relieves es tal que permite obtener una distribución no uniforme del flujo térmico entre la primera pieza 2c y la segunda pieza 3c. En efecto, los salientes en el centro de la primera pieza y de la segunda pieza son más finos que en su periferia. De este modo, la densidad de salientes es más importante en el centro de las piezas y se puede transferir un flujo térmico de la primera pieza a la segunda pieza más importante en el centro de las piezas que en su periferia. De preferencia, la altura de los salientes es uniforme en el conjunto de las piezas o en cada una de las piezas.

25 En una sexta forma de realización representada en la figura 13, la geometría de los relieves es también tal que permite obtener una distribución no-uniforme del flujo térmico entre la primera pieza 2d y la segunda pieza 3d. En efecto, los salientes en el centro de la segunda pieza son más altos que en su periferia. Como alternativa, los salientes en el centro de la primera pieza son más altos que en su periferia. De este modo, se puede transferir un flujo térmico de la primera pieza a la segunda pieza más importante en el centro de las piezas que en su periferia.

30 De preferencia, en una séptima forma de realización representada en la figura 14, la quinta forma y la sexta forma de realización se pueden combinar. En esta forma de realización, los salientes son más altos en el centro de la segunda pieza 3e y son más densos en la periferia de la primera pieza 2e y de la segunda pieza 3e. De este modo, durante la solidificación, se puede extraer un mayor flujo térmico del crisol en el centro de la primera pieza y de la segunda pieza en una primera posición relativa de estas piezas y se puede extraer un flujo térmico homogéneo del crisol en una segunda posición relativa de las piezas.

35 En una octava forma de realización representada en la figura 15, se realiza entre el fondo del crisol y la primera pieza 2f y/o entre la fuente fría y la segunda pieza 3f un espesor de gas modulable, en particular un espesor de argón modulable. Este espesor o estos espesores permiten limitar el flujo térmico transferido del crisol a la fuente fría.

40 En una novena forma de realización, se maximiza el flujo térmico que se puede transferir de la primera pieza a la segunda pieza minimizando las holguras mecánicas entre la primera pieza y la segunda pieza.

45 En una variante de la novena forma de realización, representada en la figura 16, se maximiza el flujo térmico entre la primera pieza 2g y la segunda pieza 3g minimizando las holguras mecánicas y resolviendo la dificultad de las dilataciones térmicas de los materiales. Para ello, se opta, por ejemplo por unos relieves que tienen estructuras circulares, en particular de revolución. Esto permite tener unas holguras mecánicas pequeñas en la periferia de la primera pieza y de la segunda pieza tolerando al mismo tiempo una holgura mecánica adaptada a las dilataciones térmicas en estos puntos.

50 En una décima forma de realización representada en la figura 17, se minimiza el flujo térmico mínimo entre la primera pieza 2h y la segunda pieza 3h aumentando, con respecto a la segunda forma de realización, el espesor del material aislante 24h, 34h en los extremos de los salientes.

55 En una undécima forma de realización (no representada), se minimiza el flujo térmico mínimo realizando un deflector entre los elementos de material aislante que se encuentran en los extremos de los salientes. De este modo, se bloquea el flujo térmico que podía irradiarse entre los salientes. Esto reduce las transferencias por radiación directa en la configuración aislante en la holgura mecánica entre la primera pieza y la segunda pieza.

En una duodécima forma de realización representada en la figura 18, se maximiza el flujo térmico máximo no utilizando material aislante en los extremos de los salientes de una u otra de las piezas primera y segunda. Se utiliza, en los salientes de una de las piezas primera y segunda, un material conductor 24i. Se utiliza, en los salientes de la otra de las piezas primera y segunda, un material aislante 34i.

5 En una decimotercera forma de realización representada en la figura 19, se maximiza el flujo térmico máximo previendo en los salientes de la primera pieza y/o de la segunda pieza una posibilidad de contacto entre los extremos de los salientes y los fondos de los huecos entre salientes. El contacto puede ser total o parcial. Esto permite añadir una fuerte componente de conducción entre la primera pieza y la segunda pieza. El contacto se puede hacer por medio de los materiales conductores 24j o aislantes 34j previstos en los extremos de los salientes.

Salvo incompatibilidad técnica o lógica, las diferentes formas de realización del intercambiador descritas más arriba se pueden combinar entre sí.

15 En las diferentes formas de realización, el material conductor que constituye principalmente la primera pieza y la segunda pieza puede comprender o puede ser grafito, en particular grafito denso.

Del mismo modo, en las diferentes formas de realización, el material aislante dispuesto en los extremos de los salientes puede comprender o puede ser fieltro.

20 En las diferentes formas de realización del intercambiador de acuerdo con la invención, el intercambiador comprende un elemento de desplazamiento de la primera pieza en relación con la segunda pieza.

La invención también se refiere a un procedimiento de solidificación y/o de cristalización de un material semiconductor que utiliza un intercambiador tal como se ha descrito con anterioridad. El procedimiento se caracteriza por que comprende:

- una etapa de posicionamiento de la primera pieza en relación con la segunda pieza, y
- una etapa de transferencia térmica del crisol a la fuente fría, por medio de la primera pieza y de la segunda pieza del intercambiador.

35 Por ejemplo, la etapa de posicionamiento se puede realizar durante la etapa de transferencia térmica. De este modo, se puede modificar el flujo térmico trasferido del crisol a la fuente fría durante la solidificación y/o la cristalización. De este modo, se puede modificar el coeficiente de intercambio del intercambiador entre el inicio y el final de la solidificación y/o cristalización. Para ello, se puede hacer que varíe la posición relativa de las dos piezas durante la solidificación y/o la cristalización.

REIVINDICACIONES

1. Intercambiador térmico (1) de un sistema de solidificación y/o de cristalización de un material semiconductor, que comprende una primera pieza (2; 2a; 2b; 2c; 2d; 2e; 2f; 2g; 2h; 2i; 2j) y una segunda pieza (3; 3a; 3b; 3c; 3d; 3e; 3f; 3g; 3h; 3i; 3j), siendo las primera y segunda piezas desplazables una con respecto a la otra, caracterizado por que la primera pieza comprende unos primeros relieves (21) y la segunda pieza comprende unos segundos relieves (31), estando los primeros relieves destinados a cooperar con los segundos relieves y por que comprende un elemento de desplazamiento (9) de la primera pieza en relación con la segunda pieza que permite controlar un flujo de calor intercambiado, por que el elemento de desplazamiento comprende un regulador (92) para modular la distancia entre la primera pieza y la segunda pieza en función del flujo de calor intercambiado deseado, y por que:
- los primeros relieves comprenden unos huecos (23) y unos salientes (22) y los segundos relieves comprenden unos huecos (33) y unos salientes (32), siendo variable en particular el paso de los salientes y de los huecos a lo largo de una dimensión de la primera pieza y de la segunda pieza, o
 - la altura de los salientes es variable a lo largo de una dimensión de al menos una de las primera y segunda piezas y/o los primeros y segundos relieves cooperan mediante encajamiento de los salientes dentro de los huecos.
2. Intercambiador de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por que el regulador permite posicionar las primera y segunda piezas a al menos dos distancias distintas para obtener al menos dos flujos de calor intercambiados distintos o dos coeficientes de intercambio distintos.
3. Intercambiador de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, caracterizado por que el regulador permite hacer que varíe de forma continua la distancia entre las dos piezas entre una primera posición en la que una superficie de intercambio es mínima y una segunda posición en la que la superficie de intercambio es máxima.
4. Intercambiador de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que los primeros relieves presentan unos salientes provistos de flancos inclinados paralelos a unos flancos inclinados de huecos de los segundos relieves.
5. Intercambiador de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que los primeros y segundos relieves tienen unas estructuras paralelepípedicas, en particular unas estructuras dispuestas en un mismo eje longitudinal.
6. Intercambiador de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que los salientes de los primeros relieves están recubiertos con un primer material (24; 24h; 24i; 24j) que tiene unas características térmicas diferentes del material que constituye el resto de la primera pieza, en particular que tiene unas características aislantes térmicas, y/o por que los salientes de los segundos relieves están recubiertos con un segundo material (34; 34h; 34i; 34j) que tiene unas características térmicas diferentes del material que constituye el resto de la segunda pieza, en particular que tiene unas características aislantes térmicas.
7. Intercambiador de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que los materiales de las primera y segunda piezas tienen unas características térmicas diferentes.
8. Intercambiador de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la primera pieza está destinada a estar térmicamente conectada a un crisol (4) o a un molde y por que la segunda pieza está destinada a estar térmicamente conectada a una fuente fría (5).
9. Intercambiador de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que comprende un primer elemento para crear un espesor de gas modulable entre el crisol y la primera pieza y/o por que comprende un segundo elemento para crear un espesor de gas modulable entre la fuente fría y la segunda pieza.
10. Intercambiador de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que al menos uno de los salientes de la primera y/o de la segunda piezas está dimensionado de modo que entre en contacto con el fondo de los huecos de la segunda y/o de la primera piezas en una posición relativa particular de las primera y segunda piezas.
11. Sistema de solidificación y/o de cristalización de un material semiconductor que comprende un intercambiador de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores.
12. Procedimiento de solidificación y/o de cristalización de un material semiconductor que utiliza un intercambiador de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 10, caracterizado por que comprende:
- una etapa de posicionamiento de la primera pieza en relación con la segunda pieza, realizándose en particular la etapa de posicionamiento durante la etapa de transferencia térmica y
 - una etapa de transferencia térmica del crisol a la fuente fría, por medio de las primera y segunda piezas del intercambiador.

13. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 12, caracterizado por que se hace que varíe el coeficiente de intercambio del intercambiador entre el inicio y el final de la solidificación y/o cristalización.

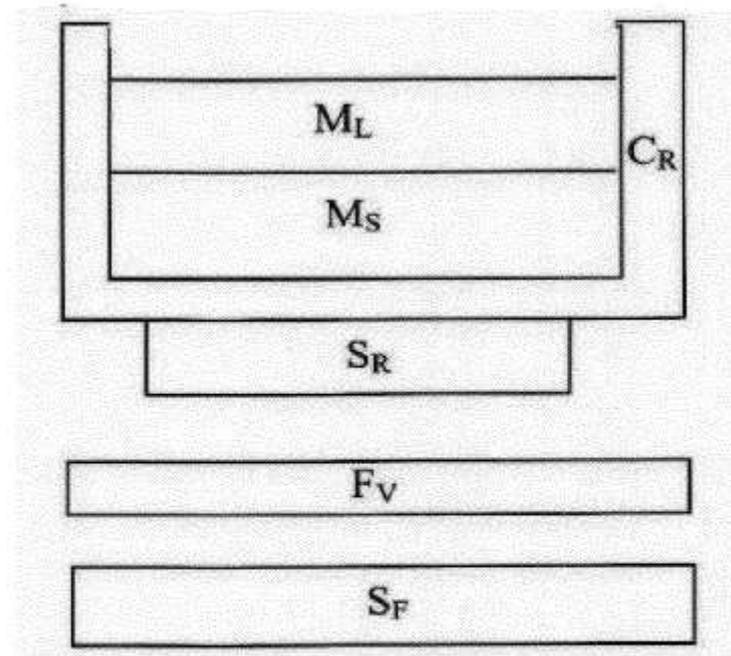


FIG.1

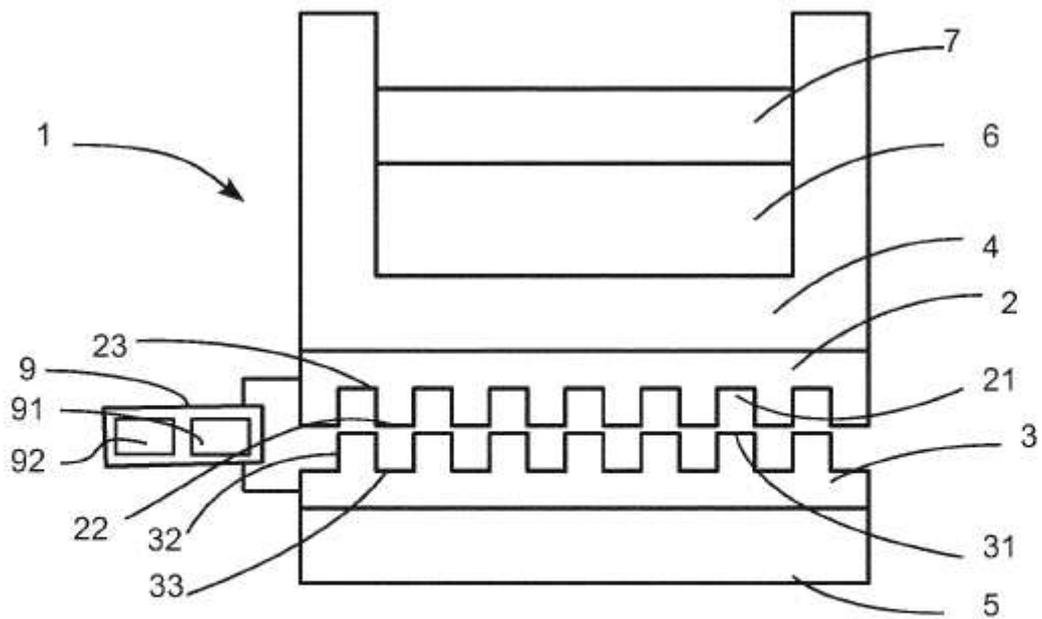


FIG.2

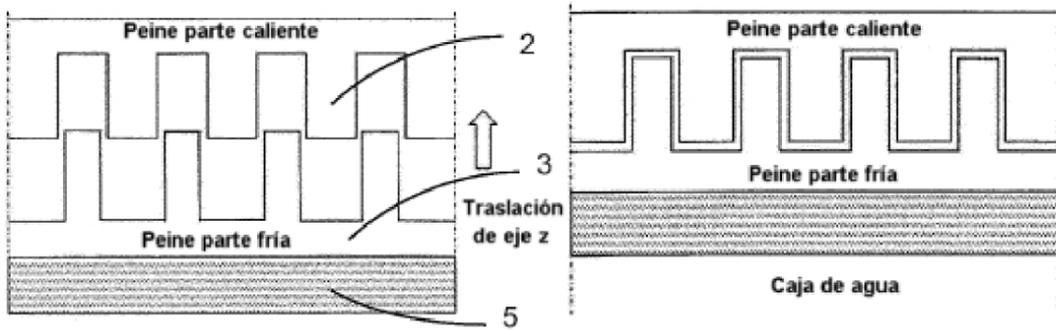


FIG.3

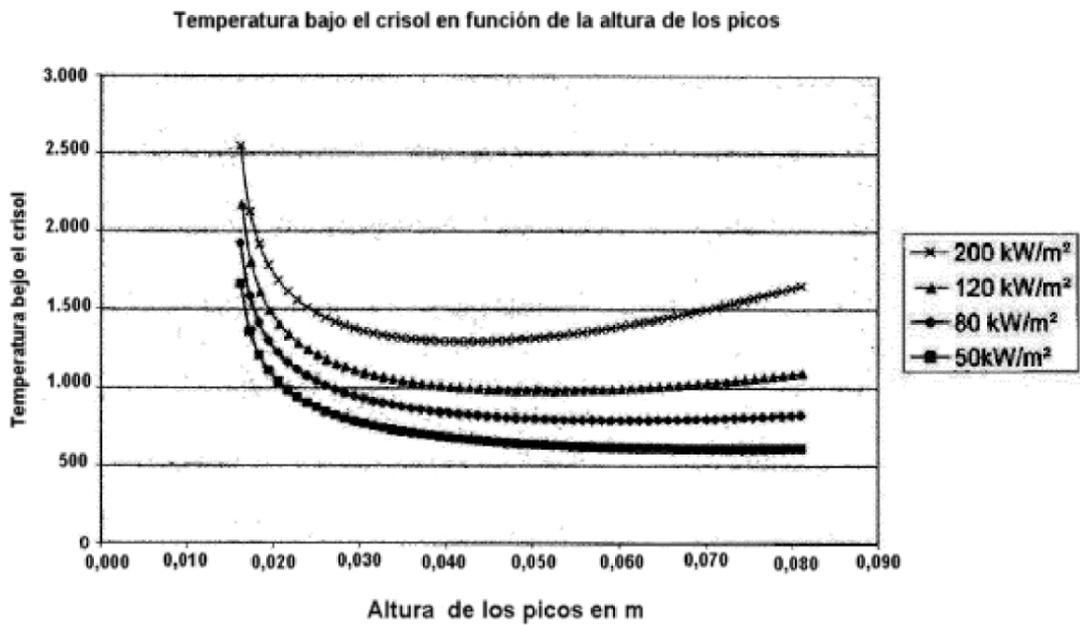


FIG.4

Temperatura bajo el crisol en función de la relación entre superficie picos inferior/superior

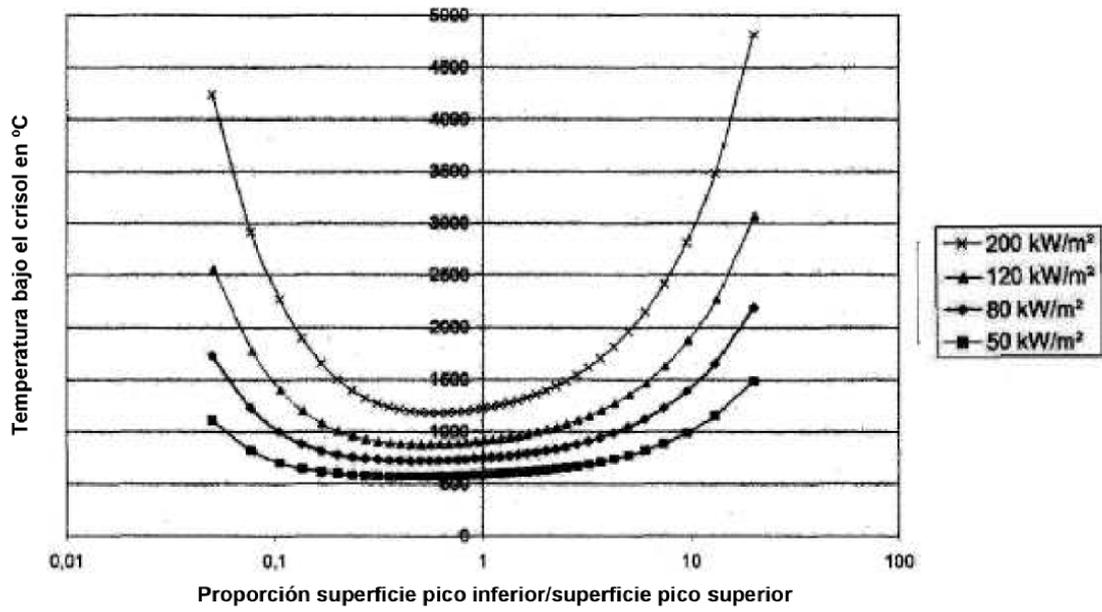


FIG.5

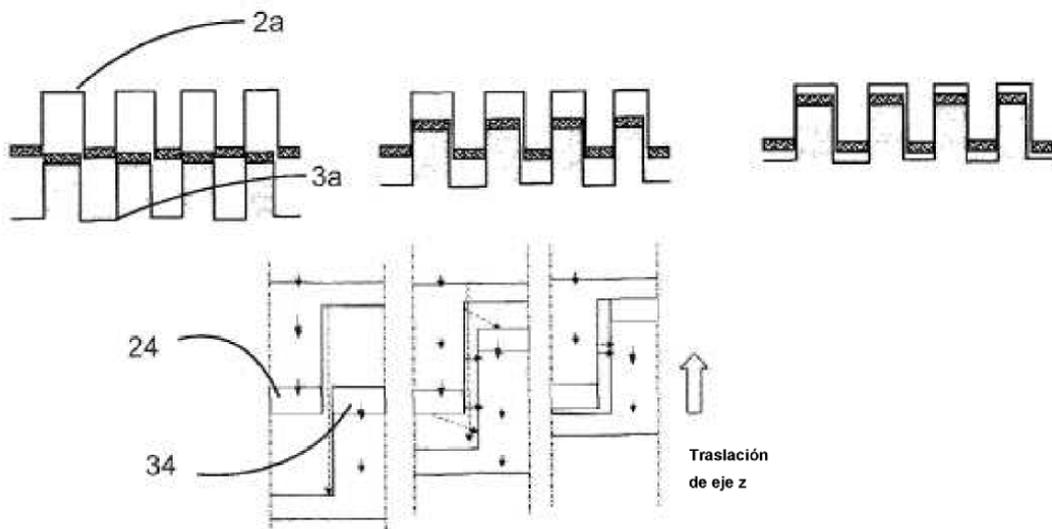


FIG.6

Comparación de los flujos en función de las posiciones en el eje z

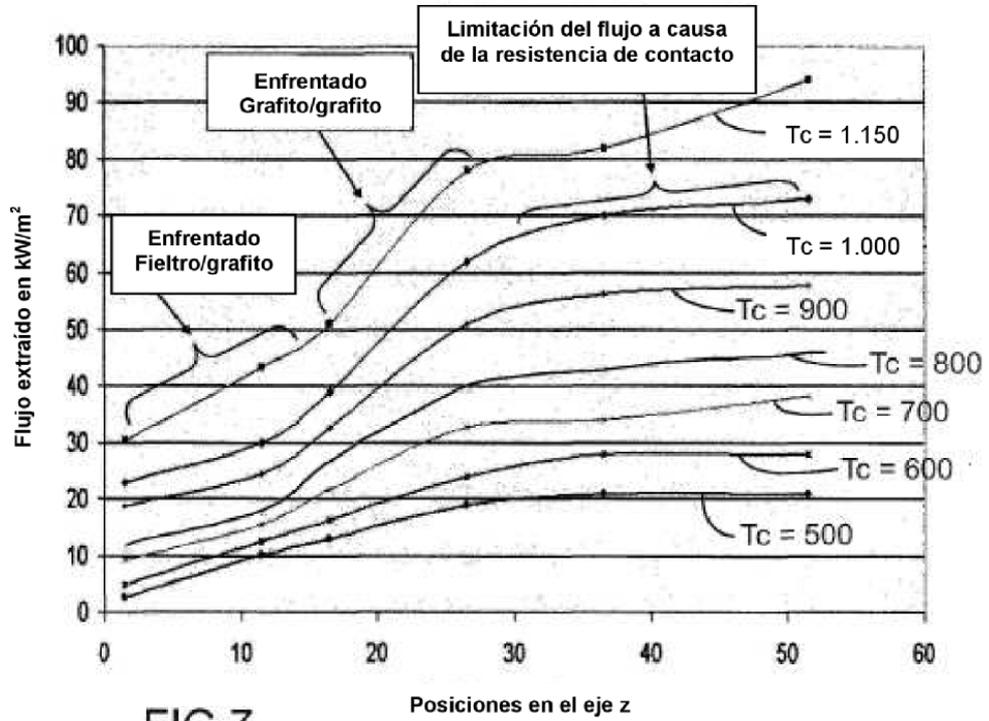


FIG.7

Comparación flujo máx.

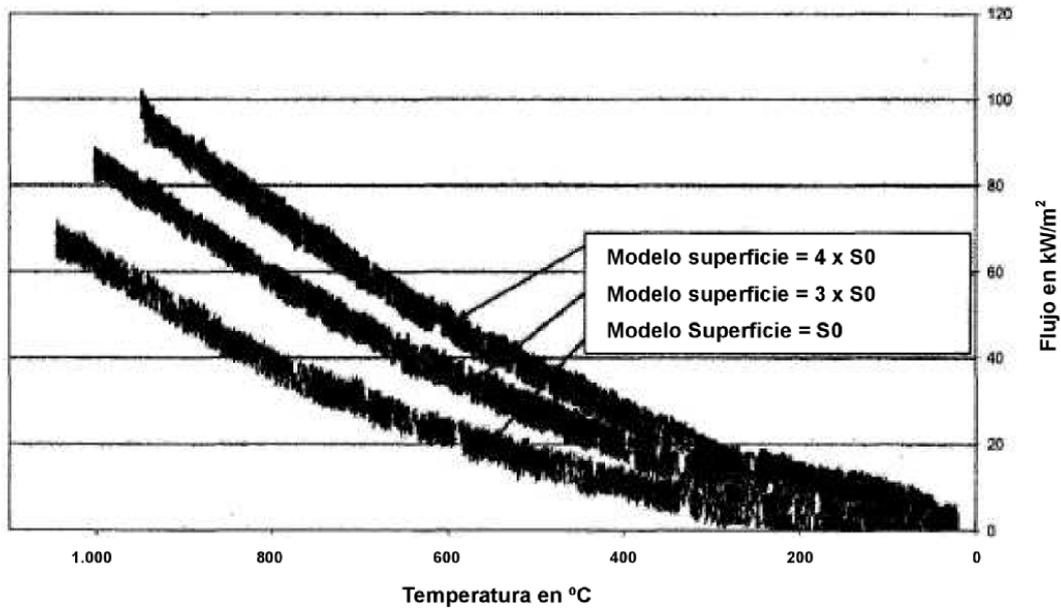


FIG.8

Comparación Flujo Mín.

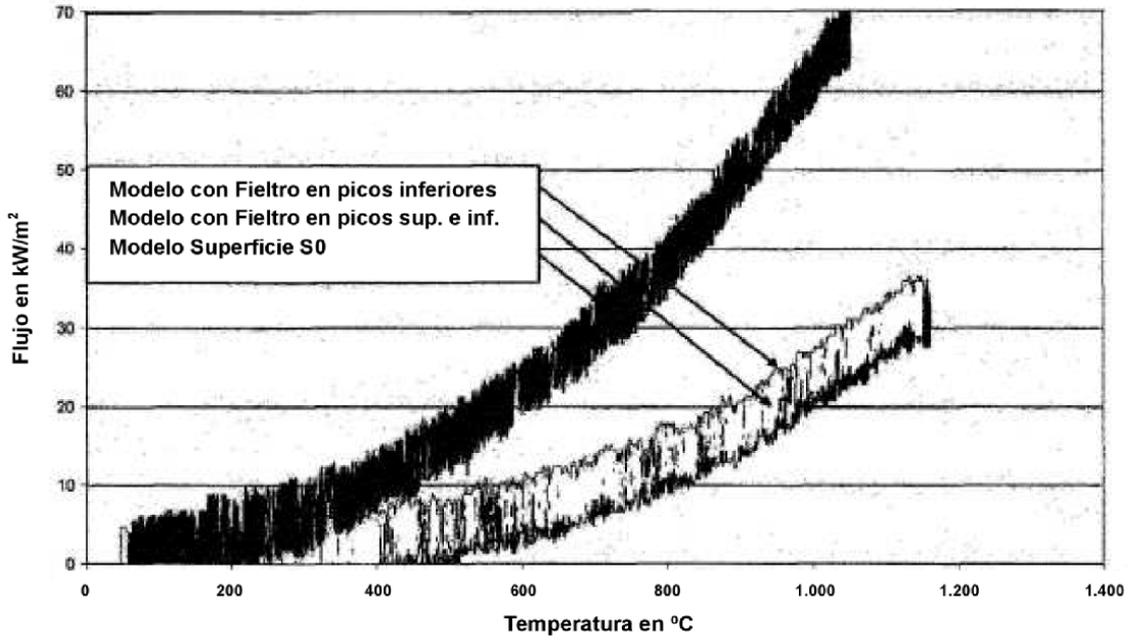


FIG.9

Coefficientes de intercambio durante el enfriamiento modelo A

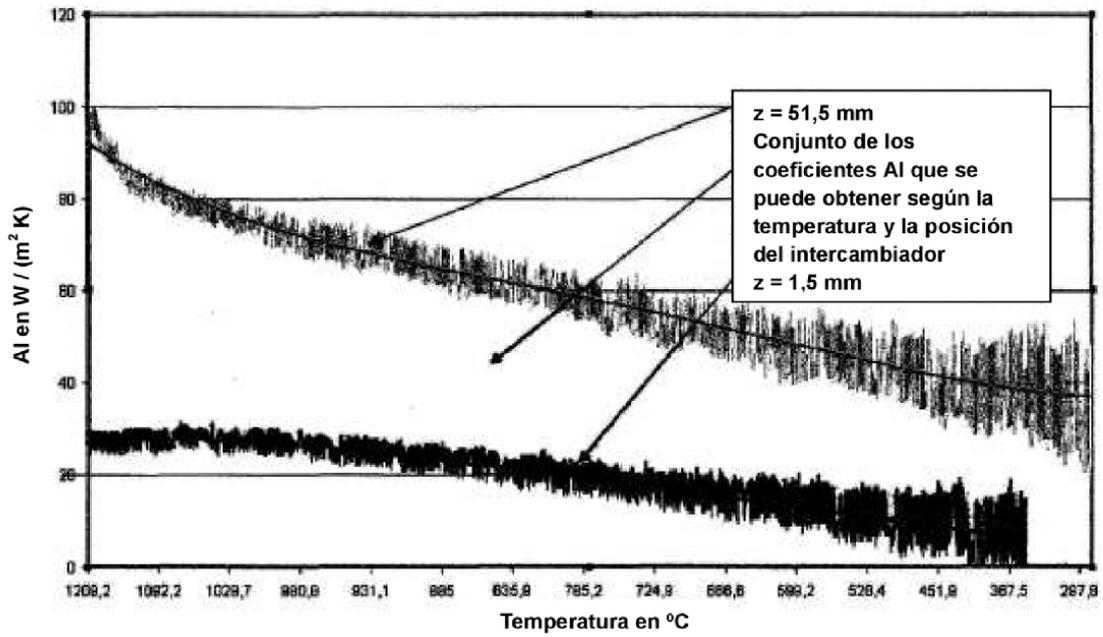


FIG.10

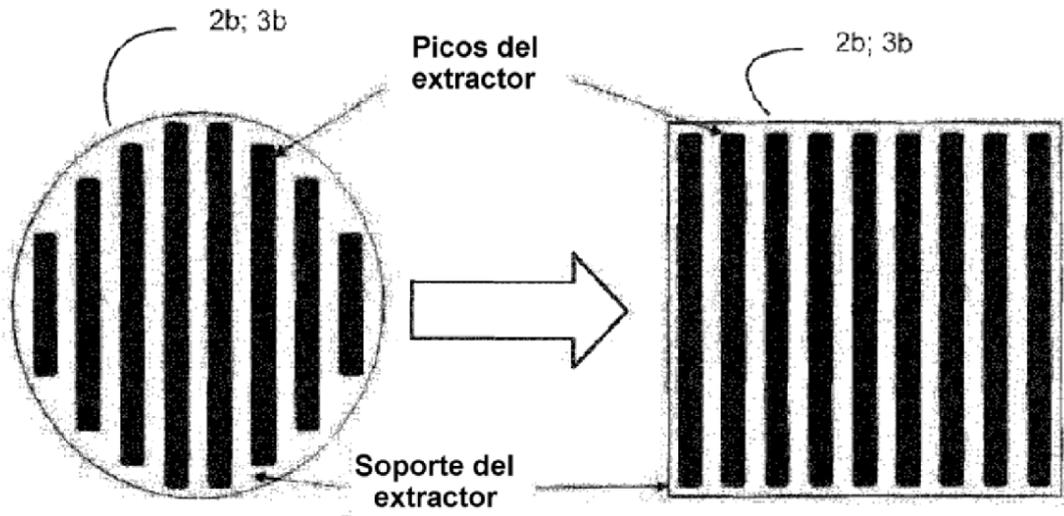


FIG. 11

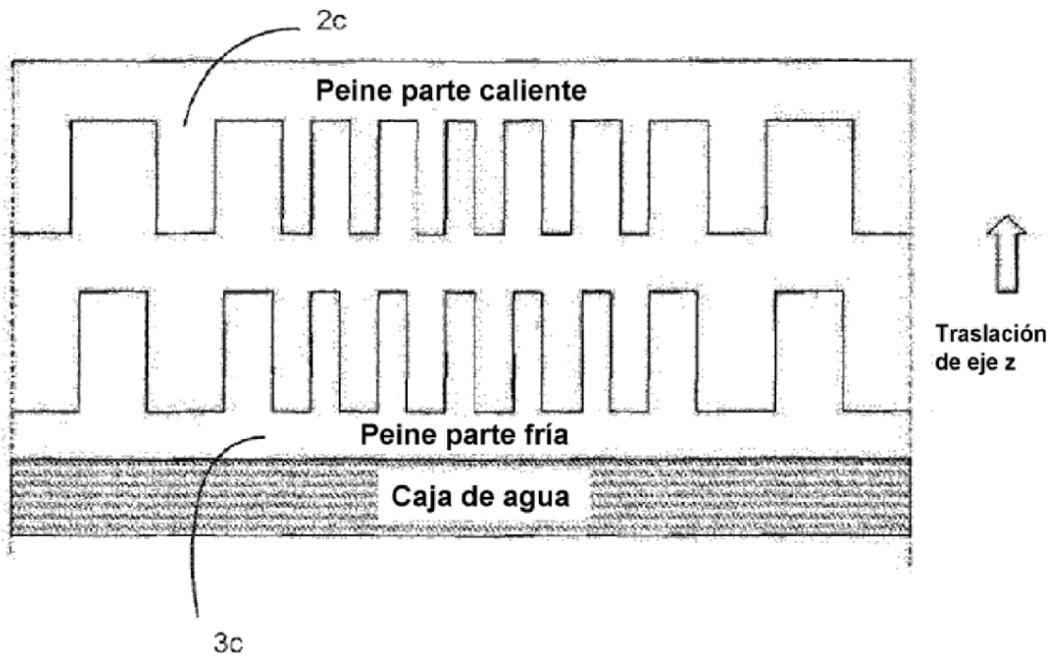


FIG. 12

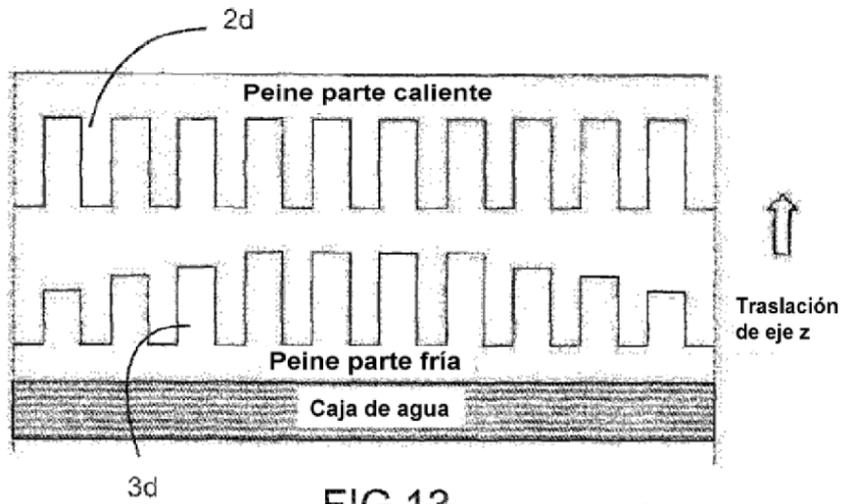


FIG. 13

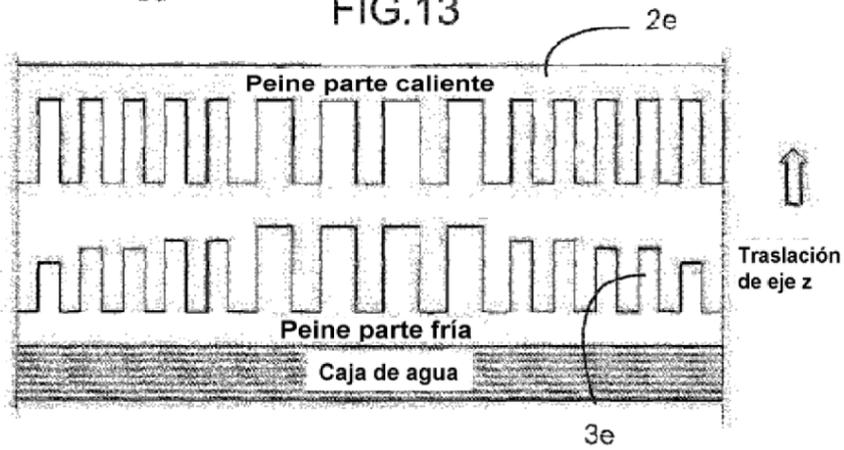


FIG. 14

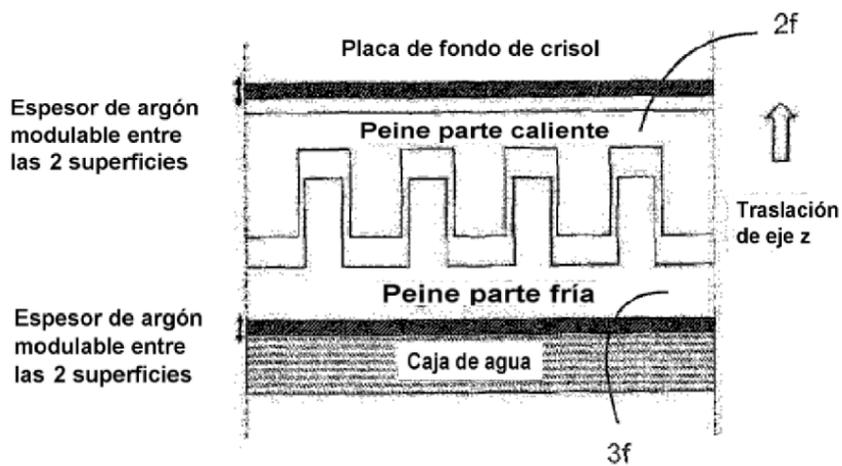


FIG. 15

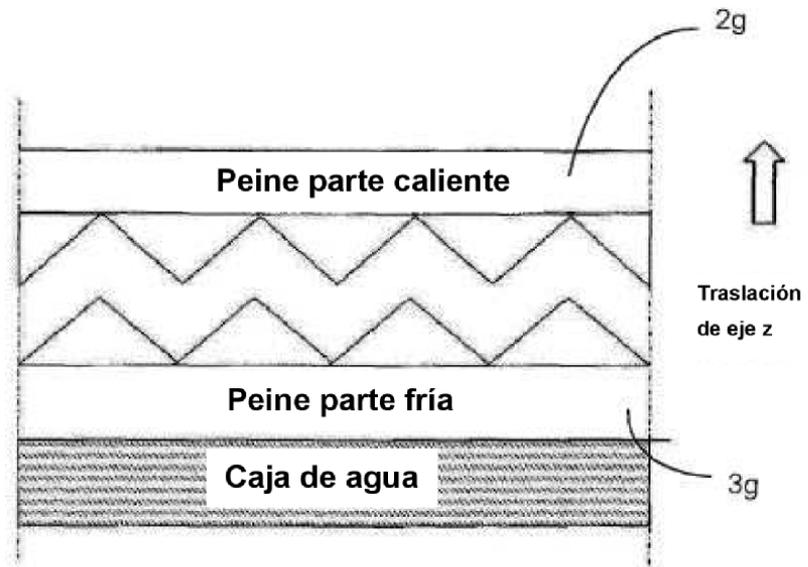
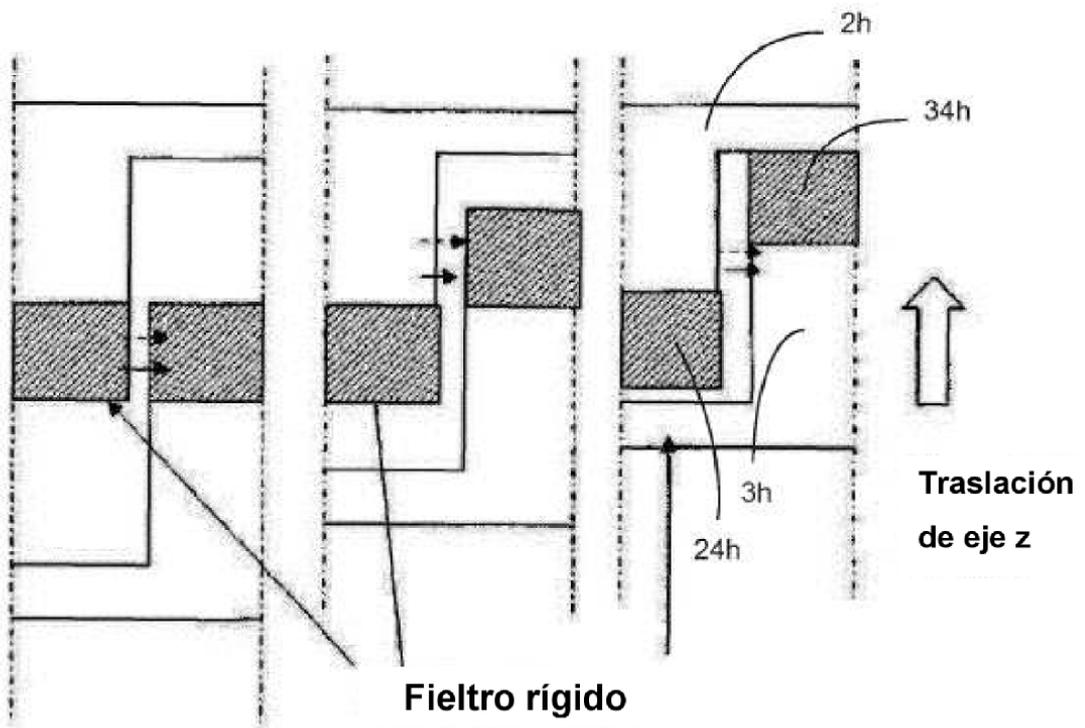


FIG.16



Filtro rígido

FIG.17