

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 402 446**

51 Int. Cl.:

**C30B 11/00** (2006.01)

**C30B 15/30** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **12.11.2009 E 09749132 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.12.2012 EP 2370617**

54 Título: **Proceso para la solidificación de un material fundido no metálico**

30 Prioridad:

**28.11.2008 DE 102008059521**

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

**03.05.2013**

73 Titular/es:

**FORSCHUNGSVERBUND BERLIN E.V. (100.0%)  
Rudower Chaussee 17  
12489 Berlin, DE**

72 Inventor/es:

**BÜLLESFELD, FRANK;  
SAHR, UWE;  
MILLER, WOLFRAM;  
RUDOLPH, PETER;  
REHSE, UWE y  
DROPKA, NATASCHA**

74 Agente/Representante:

**IZQUIERDO FACES, José**

**ES 2 402 446 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

Proceso para la solidificación de un material fundido no metálico.

5 **[0001]** La invención concierne un proceso que sigue el concepto general de la solicitud adjunta. La invención concierne en especial un proceso para la solidificación controlada del silicio en estado fundido.

10 **[0002]** En la industria solar es usual producir cristales de silicio mediante solidificación dirigida, para la fabricación de celdas solares. Para esto, la materia base en forma granular es fundida en un crisol de vidrio de cuarzo, para luego ser solidificada controladamente bajo la aplicación de un gradiente de temperatura vertical. El bloque así obtenido, llamado lingote, es cortado con sierra en estrechas rebanadas de silicio, que pueden ser transformadas en celdas solares mediante subsecuentes pasos del proceso. El crisol de fundición usualmente está recubierto de una capa de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (ver por ejemplo el artículo "Transition metals in photovoltaic-grade ingot-coat multicrystalline silicon: Assessing the role of impurities in silicon nitride crucible lining material" de T. Buonassis et al, publicado en el Journal of Crystal Growth, 287 (2006), páginas 402-407) que protege los lados del crisol contra el agresivo silicio fundido y también facilita el despegar el lingote del crisol después del enfriamiento. La corriente convectiva predominante en el silicio fundido será esencialmente determinada mediante el campo de temperatura. Sin embargo existen posibilidades de influir en la corriente en especial mediante la aplicación de campos magnéticos estacionarios y variantes. Es sabido, en lo referente a la creación de un campo magnético de ondas progresivas, cuál ofrece la posibilidad de ejercer una influencia fuerte en la corriente presente en el silicio fundido, con una fuerza de campo relativamente baja. Un panorama de la aplicación de campos magnéticos estacionarios y no estacionarios en la generación de cristales aparece en el artículo "Travelling magnético fields applied to bulk crystal growth from the melt: The step from basic research to industrial scale" de P. Rudolph, publicado en el Journal of Crystal Growth, 310 (2008), páginas 1298-1306.

25 **[0003]** En la solicitud de patente DE 35 27 387 A1 se da a conocer un proceso para la manipulación electromagnética de soluciones metálicas, en el cual unos inductores, situados en el crisol de fundición, son alimentados con corriente trifásica de distintas frecuencias, para crear campos magnéticos, que se presentan como campos rotatorios superpuestos, en dirección acimutal. Por consiguiente, está prevista la disposición en forma de un bobinado de estator, como es conocido para el motor de corriente trifásica, para acentuar en el plano horizontal los campos trifásicos rotatorios. Aunque estas acciones son adecuadas para las manipulaciones de materiales fundidos magnéticos, son más bien inadecuadas para la solidificación de materiales fundidos no metálicos, sobre todo si deben realizarse en dirección vertical.

35 **[0004]** En la solicitud de patente DE 10 2006 020 234 A1 se dan a conocer un dispositivo en forma de horno así como un proceso para la solidificación de un material fundido no metálico. En él se crea un campo de ondas progresivas con tres bobinas, que son alimentadas con una corriente trifásica de fases diacrónicas. Las bobinas, mejor dicho los inductores son dispuestos de tal manera que creen esencialmente un campo de ondas progresivas vertical. Sin embargo, dicho campo de ondas progresivas genera una alta densidad de fuerza de Lorentz, en especial en la zona de las orillas del crisol de fundición. Esto tiene como consecuencia una alta velocidad del material fundido en la orilla del crisol, que repercute perjudicialmente, en especial causando erosión, en el lado interior del crisol de fundición.

45 **[0005]** En la solicitud de patente DE 103 49 339 A1 se describe un dispositivo de generación de cristales con un calentador, que al mismo tiempo presenta un inductor para la creación de un campo magnético de ondas progresivas. Así, el inductor es conectado a una fuente de corriente para una corriente trifásica y así se crea un campo magnético de ondas progresivas con sólo una frecuencia.

50 **[0006]** En la solicitud de patente DE 101 02 126 A1 se describe un proceso para la fabricación de cristales mediante extracción del material fundido, aplicando un campo magnético de ondas progresivas de una frecuencia.

55 **[0007]** En la solicitud de patente DE 10 2007 020 239 A1 se describe un dispositivo para la fabricación de cristales a partir de un material fundido electroconductor, que contiene una configuración multi-bobina como aditamento de calentamiento. Sin embargo, la configuración multi-bobina sólo se puede accionar con corriente alterna de una frecuencia. La tarea de la invención es, por consiguiente, superar las desventajas nombradas arriba con ventajas. En especial, un proceso de la forma nombrada al comienzo debe ser mejorado de modo que la distribución de corriente y la solidificación de un material fundido no metálico se puedan realizar controladamente.

60 **[0008]** La tarea fue resuelta mediante un proceso con las características de la solicitud 1.

65 **[0009]** Por consiguiente se propone un proceso para la solidificación de un material fundido no metálico, en el que, por medio de varios inductores se creen campos magnéticos, para lo cual los inductores son alimentados con un primer conjunto de corrientes alternas desfasadas en primera frecuencia, de manera que mediante la superposición de los campos magnéticos se cree un campo de ondas progresivas en el material fundido, y sean alimentados con al menos un segundo conjunto de corrientes alternas desfasadas y en segunda frecuencia, mientras que mediante la superposición de los campos magnéticos creados con la segunda frecuencia, se produzca un segundo campo de

ondas progresivas en el material fundido, que avance en la dirección opuesta a la del primer campo de ondas progresivas, y al mismo tiempo, de manera que al menos los dos campos de ondas progresivas creados recorran el material fundido preferentemente en sentido contrario, en dirección vertical.

5 **[0010]** Para esto se pueden emplear varios inductores en la generación de campos magnéticos superpuestos, para lo cual los inductores se alimentan con al menos dos conjuntos de corrientes alternas desfasadas, que presentan distintas frecuencias, con el objetivo de crear un primer campo de ondas progresivas y al menos un segundo campo de ondas progresivas en el material fundido, que avance en el sentido opuesto al primero, para lo cual los inductores son colocados en una disposición vertical en el crisol, de modo que los campos de ondas progresivas creados recorran el material fundido en dirección vertical y las partes radiales del campo se eleven de lados contrarios.

15 **[0011]** Mediante esta combinación de características se construyen dos campos de ondas progresivas contrapuestos, en dirección vertical, lo que causa que en la zona de la orilla predomine una densidad de fuerza de Lorentz, que repercute en una velocidad moderada y en la parte del volumen del material fundido. Mediante la regulación de los parámetros, en especial mediante la elección de la relación entre ambas frecuencias, se puede definir una distancia suficiente respecto a las paredes interiores del crisol de fundición, donde predomina el mayor espesor de la densidad de la fuerza de Lorentz. Según este principio, también se pueden generar más de dos campos de ondas progresivas superpuestos en dirección vertical.

20 **[0012]** Preferentemente, los inductores se disponen como bobinas, por ejemplo; es decir como un bobinado perimetral en dirección horizontal, para lo que las bobinas se pueden acomodar en dirección vertical, separadas, una encima de la otra, o también en dirección vertical, pero intercaladas. En relación con esto, tanto el crisol como el bobinado y la parte interior de cada bobina pueden ser cuadrados en su sección transversal.

25 **[0013]** Preferentemente, los inductores se pueden alimentar también con una corriente de calor consistente en una parte de corriente alterna y otra de corriente continua para calentar el crisol. En relación con esto, es necesario para la generación efectiva del campo de ondas progresivas, que la corriente de calor tenga una parte de corriente alterna de al menos un porcentaje fijo, en especial de al menos 10%. Esto también es ventajoso si la primera frecuencia y la segunda frecuencia se diferencian máximo por un factor fijo, en especial por el factor 2-40. La relación de las frecuencias, mejor dicho, el factor, puede ser regulado dependiendo del proceso, por ejemplo, dependiendo de los grados de cristalización.

35 **[0014]** De preferencia, el primer y/o segundo conjunto de los campos de ondas progresivas desfasados pueden presentar varios campos de ondas progresivas no equidistantes entre sí.

**[0015]** La invención es especialmente adecuada para su aplicación en un horno de fundición, es decir, caldera para silicio fundido. En relación con esto, el crisol de fundición puede ser revestido con una pantalla de protección en la pared interior, en especial una pantalla de Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, y ser formado como crisol de vidrio de cuarzo.

40 **[0016]** Respecto al proceso adecuado a la invención, los parámetros privilegiados se pueden modificar para que la primera frecuencia y la segunda frecuencia, así como una primera profundidad de penetración (ED) y una segunda profundidad de penetración para los respectivos campos magnéticos creados, cumplan la siguiente ecuación:

$$D < \frac{ED1 \cdot ED2 \cdot \ln(x)}{ED2 - ED1} ,$$

a lo cual

$$x = \frac{FD1 \cdot ED2}{FD2 \cdot ED1}$$

45 **[0017]** La profundidad de penetración ED es la distancia D desde la orilla del crisol, donde la densidad de la fuerza de Lorentz FD sobre 1/e\*FD desciende.

**[0018]** Enseguida, la invención y las ventajas que resultan de ella serán descritas en detalle, acompañadas de explicaciones y ejemplos y referencias a los diagramas incluidos, para lo cual:

50 La Figura 1 presenta esquemáticamente la construcción de un dispositivo para la realización del proceso adecuado a la invención referente a la solidificación de un material fundido no metálico;

La Figura 2 presenta un diagrama de función con el desplazamiento de las densidades de la fuerza de Lorentz, dependiendo de la distancia respecto al muro del crisol de fundición; y

55 La Figura 3 presenta un diagrama de función con el desplazamiento de las densidades de la fuerza de Lorentz, adaptados al proceso adecuado a la invención.

**[0019]** La Figura 1 muestra en una presentación esquemática un dispositivo 100 para solidificar un material fundido no metálico 130, que se encuentra en un crisol 120. El material fundido es, por ejemplo, silicio fundido y el crisol 120 representa un crisol de vidrio de cuarzo, cuadrado en este caso, a manera de ejemplo. Desde afuera se disponen varios inductores 110 en torno al crisol, para inducir, mediante la alimentación de corrientes alternas, campos magnéticos en el material fundido 130, de modo que al menos dos campos de ondas progresivas W1 y W2 superpuestos y contrapuestos se muevan en dirección vertical Y. Por ejemplo, se disponen cuatro inductores 110 a hasta 110d sobrepuestos en dirección vertical y son alimentados con un primer conjunto de Corrientes alternas desfasadas 11a – 11d, así como con un Segundo conjunto de Corrientes alternas desfasadas 12a - 12 d. El primer conjunto de corrientes alternas desfasadas es alimentado con una primera frecuencia f1, que, por ejemplo, asciende a 200 Hz. El segundo conjunto de corrientes alternas desfasadas es alimentado con una segunda frecuencia f2, que, por ejemplo, asciende a 20 Hz.

**[0020]** Como se muestra en la Figura 2, de la superposición de los campos de ondas progresivas W1 y W2 así generados resulta una superposición de las densidades de la fuerza de Lorentz FD1 con FD2 que se acumulan en una densidad de la fuerza de Lorentz FD\*. La primera densidad de la fuerza de Lorentz FD1 es generada mediante la alimentación del primer conjunto de corrientes alternas 11 a - 11 d, para lo cual en la zona de la orilla del crisol, es decir  $D = 0$ , se crea una densidad de la fuerza de Lorentz relativamente alta. Mediante la alimentación del Segundo conjunto de corrientes alternas desfasadas 12 a – 12 d, ocurre un desplazamiento de la densidad de la fuerza de Lorentz FD2, que en la zona de la orilla, es decir en  $D = 0$ , tiene un valor negativo. Mediante la superposición de FD1 y FD2 resulta por lo tanto un desplazamiento de la densidad de la fuerza de Lorentz FD\*, que en la zona de la orilla muestra un valor reducido. Mediante la regulación de los parámetros, en especial de las frecuencias f1 y f2, se puede lograr, siguiendo las características de la invención, que en la zona de la orilla, la velocidad de corriente resultante será muy limitada o idealmente nula.

**[0021]** La figura 3 muestra el desplazamiento de la densidad de la fuerza de Lorentz FD\* resultante, con varias modificaciones de los parámetros. La curva superior FD\*\* muestra el desplazamiento de la densidad de la fuerza de Lorentz, si la primera frecuencia f1 se fija a 20 Hz y el correspondiente campo de ondas progresivas W1 se estira desde abajo hacia arriba, y si la segunda frecuencia f2 se fija en 400 Hz, ante lo cual el campo de ondas progresivas W2 correspondiente se estira de arriba hacia abajo. La segunda curva FD\*\*\* resulta, si f1 asciende a 20 Hz y W1 se desplaza de abajo hacia arriba, así como si f2 equivale a 200 Hz y W2 se desplaza de arriba hacia abajo. La tercera curva FD\*\*\*\* resulta, si f1 equivale a 200 Hz y se desplaza de arriba hacia abajo y si f2 equivale a 400Hz y se desplaza de abajo hacia arriba.

**[0022]** Como se aprecia con una comparación de los desplazamientos de las curvas presentados, en total se presentan tres ejemplos de las densidades de la fuerza de Lorentz FD\* resultantes en la zona de la orilla, es decir,  $D = 0$ , claramente reducida: asciende a alrededor de  $0 \text{ N/m}^3$ . Mediante la elección de las relaciones f1 a f2, el máximo de la densidad de la fuerza de Lorentz cambia de sitio hacia el interior del material fundido, es decir a  $D > 0$ . La segunda curva FD\*\* tiene por esto mismo una densidad de la fuerza de Lorentz máxima en la zona de  $D = 0,06$ . Respecto a los otros desplazamientos de la curva, el máximo está ubicado a una distancia más reducida. El desplazamiento de la curva FD\*\* tiene un máximo en la zona de  $D = 0,04$  y el desplazamiento de la curva Fd\*\*\*\* tiene un máximo en la zona de  $D = 0,025$ . Por consiguiente el máximo de la densidad de la fuerza de Lorentz puede ser desplazado especialmente lejos hacia adentro del material fundido, si una de las dos frecuencias, aquí f1, es relativamente reducida y, por ejemplo, asciende a 20 Hz y si la otra frecuencia, aquí f2, no es mucho más grande, de modo que, por ejemplo, no sea más grande que 40 veces f1.

**[0023]** Mediante la elección de las frecuencias f1 y f2 se puede lograr que la velocidad de la corriente en la orilla del crisol sea muy reducida y no mayor de 0 hasta 1 cm/seg. También se puede lograr que la velocidad de la corriente en el interior del material fundido, en torno a la distancia de  $D = 1 \text{ cm}$ , sea mayor a 0,01, hasta 2 cm/seg. El desplazamiento de la densidad de la fuerza de Lorentz y la velocidad que se desprende de éste, respecto al influjo en la convexión, pueden ser manipulados especialmente mediante la parametrización de las frecuencias a partir de la dirección de propagación, el desplazamiento de fase, la amplitud y la geometría de los inductores. Para la generación de los campos de ondas progresivas, los inductores deben ser alimentados con una corriente relativamente alta, de, por ejemplo, 200 A, por lo cual, a causa de la pérdida óhmica, surge el calentamiento de los inductores. En vez de dispersar este calor mediante medidas de refrigeración, también puede preverse que los inductores arranquen al mismo tiempo que los elementos de calefacción para un calentamiento controlado del material fundido. Esto es favorable si adicionalmente a las corrientes alternas, que producen los campos de ondas progresivas, también se activa una corriente de calor, que sólo emplee corriente continua. La relación de la parte de corriente alterna a la corriente continua puede ser modificada de acuerdo al proceso.

**[0024]** Para la generación del desplazamiento de función descrito de la densidad de la fuerza de Lorentz (ver Fig. 2 y 3), ante todo, es indispensable la parametrización de las corrientes alternas 11a – 11d y 12a – 12 d. Al mismo tiempo se ha mostrado que para la generación del máximo de densidad de la fuerza de Lorentz en el interior de un material fundido, se debe cumplir la siguiente condición:

$$FD1/FD2 > ED1/ED2 \text{ y } ED2 > ED1.$$

[0025] En esto, FD1 significa respecto a FD2 la magnitud de la densidad de la fuerza de Lorentz en la pared del crisol, así como ED1 con respecto a ED2 significa la profundidad de penetración del campo magnético.

5 [0026] La distancia de la densidad de la fuerza de Lorentz máxima y desplazada de la pared del crisol se obtiene por medio de la siguiente relación:

$$D^* < ED1 \cdot ED2 / (ED2 - ED1) \cdot LN (FD1 \cdot FD2 / FD2 \cdot ED1),$$

10 en la que D\* representa la distancia mínima respecto a la pared.

[0027] Para la aplicación de la invención en la fundición y solidificación del silicio solar en un crisol de vidrio de cuarzo se ha demostrado especialmente favorable que el máximo del campo de fuerza esté a una distancia de alrededor de 0,1 cm hasta 40 cm respecto a la pared del crisol, es decir, D = 0,1 hasta 40 cm.

15 [0028] Para la aplicación de corriente a los inductores o bobinas, también se puede prever que el desfaseamiento entre las bobinas individuales sea no-equidistante. Ya que la disposición vertical de los inductores presenta esencialmente una sección de un modo linear estirado en dirección vertical, que puede ser alimentado sección por sección con corrientes desfasadas de muchas maneras.

20 [0029] Mediante la siguiente Tabla 1, se dan los parámetros para un primer ejemplo explicativo.

<b>Tabla 1</b>				
<b>Bobinado</b>	<b>110a</b>	<b>110b</b>	<b>110c</b>	<b>110d</b>
f1 en Hz	200	200	200	200
f2 en Hz	20	20	20	20
FD1 máx. rel. unidades	0,1	0,1	0,1	0,1
FD2 máx. rel. unidades	0,053	0,053	0,053	0,053
Desfasamiento de 11a-d	0	90	180	270
Desfasamiento de 12a-d	0	-90	-180	-270

25 [0030] Los datos de FD1 y FD2 son datos relativos, que hacen referencia a la magnitud de referencia de X N/m3. El silicio generado con los parámetros dados y la celda solar fabricada a partir de él muestran un grado de efectividad claramente más alto que las celdas solares usuales. Además de eso, el lingote se puede desprender del crisol de vidrio de cuarzo más fácilmente. Se registran menos puntos de adhesión del lingote al crisol de vidrio de cuarzo que con el método convencional. Adicionalmente, el material fundido se ensucia mucho menos con componentes del material del crisol o del recubrimiento. El lingote recibe por lo tanto menos excreciones de fases ajenas.

30 [0031] Para otro ejemplo, se dan en la Tabla 2 las parametrizaciones como sigue:

<b>Tabla 2</b>				
<b>Bobinado</b>	<b>110a</b>	<b>110b</b>	<b>110c</b>	<b>110d</b>
f1 en Hz	100	100	100	100
f2 en Hz	20	20	20	20
11 (a-d) in A	200	200	200	200
12 (a-d) in A	200	200	200	200
FD1 máx. rel. unidades	20	20	20	20
FD2 máx. rel. unidades	17,5	17,5	17,5	17,5
Desfasamiento de 11 (a-d)	0	90	180	270
Desfasamiento de 12 (a-d)	0	-120	-240	-360

35 [0032] La densidad de la fuerza de Lorentz resultante se presenta en la Figura 2.

5 **[0033]** En cuanto a los campos magnéticos generados adecuados a la invención, la densidad de fuerza de Lorentz resultante alcanza su máximo, cuando se encuentra a una distancia  $D^*$  de la zona de la orilla. El desplazamiento de la densidad de la fuerza de Lorentz y la ubicación del máximo se pueden ajustar en especial mediante la elección de las relaciones entre la primera frecuencia  $f_1$  y la segunda frecuencia  $f_2$ . La disposición, adecuada a la invención, también es propicia para ser aplicada en el crisol de fundición rectangular, es decir, cuadrado. El bobinado puede correr en este caso de cualquier manera rectangularmente en torno a la orilla del crisol, sin que por esto se afecte negativamente el modo de funcionamiento de la generación de los campos magnéticos. La disposición de los inductores en dirección vertical también admite que se intercalen éstos. Preferentemente se instala un conjunto de inductores, que es alimentado con ambas frecuencias. Alternativamente, también se puede prever un conjunto de inductores para cada frecuencia. Además, los inductores también pueden ser empleados como calentadores. Para esto también se debe alimentar una corriente continua, para lo cual, la parte de corriente alterna asciende con  $f_1$  y/o  $f_2$  a 10%. Finalmente, resulta un dispositivo muy efectivo para la solidificación de materiales fundidos no metálicos, en especial el silicio fundido, para el cual se vuelve posible una solidificación controlada y vertical.

15 **Lista de signos de referencia**

**[0034]**

20	100	Dispositivo (aquí: horno de fundición) para la realización del proceso
	110	Inductores (bobinado de disposición horizontal)
	110a – 100d	Bobinado de los inductores
	120	Crisol, aquí un crisol de vidrio de cuarzo con revestimiento interior
	130	Material fundido, aquí silicio fundido
25	11a – 11d	primer conjunto de corrientes alternas desfasadas
	12 a – 12d	primer conjunto de corrientes alternas desfasadas
	W1, W2	primer y segundo campos de ondas progresivas (en direcciones opuestas)
	FD	Densidad de la fuerza de Lorentz (en $N/m^3$ )
30	FD1, FD2	Densidad de la fuerza de Lorentz en base a un campo de corrientes alternas
	FD*	Densidad de la fuerza de Lorentz resultante (por superposición); FD*', FD**, FD*** distintos desplazamientos
	D	Distancia de la pared interior del crisol (en m)
	ED	Profundidad de penetración del campo magnético

REIVINDICACIONES

- 5 1.- Proceso para la solidificación de un material fundido no metálico (130), que se encuentra en un crisol (120), en el que, por medio de varios inductores (100), se generan campos magnéticos, para lo cual los inductores (100) son alimentados con un primer conjunto de corrientes alternas ( 11a, 11b, 11c, 11d) desfasadas y con una primera frecuencia (f1), de manera que mediante la superposición de campos magnéticos se genere un campo de ondas progresivas (W1) en el material fundido (130), y éste sea alimentado con al menos un segundo conjunto de corrientes alternas (12a, 12b, 12c, 12d) desfasadas con una segunda frecuencia (f2), **caracterizado porque** mediante la superposición del campo magnético generado con la segunda frecuencia (f2), se genera un segundo campo de ondas progresivas (W2) en el material fundido (130), que se mueve en dirección contraria al campo de ondas progresivas (W1), por lo que los dos campos de ondas progresivas generados (W1, W2) recorren el material fundido (130) en una dirección (Y) esencialmente vertical.
- 10
- 15 2.- Proceso según la reivindicación 1, **caracterizado porque** los inductores (100) en el crisol (120) están colocados en una disposición vertical, de forma que los dos campos de ondas progresivas creadas (W1, W2) en el material fundido (130) se mueven en una dirección (Y) esencialmente vertical.
- 20 3.- Proceso según la reivindicación 2, **caracterizado porque** un conjunto de inductores (100) están instalados en el crisol (120), que son alimentados con corrientes alternas ( 11a, 11b, 11c, 11d; 12a, 12b, 12c, 12d) de la primera y la segunda frecuencia (f1, f2).
- 25 4.- Proceso según la reivindicación 2, **caracterizado porque** dos conjuntos de inductores serán instalados en el crisol, de los que el primer conjunto va a ser alimentado por una corriente alterna de la primera frecuencia y el otro conjunto va a ser alimentado con una corriente alterna que tiene la segunda frecuencia.
- 30 5.- Proceso según reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** se van a generar más de dos campos de ondas progresivas superpuestos en dirección esencialmente vertical.
- 35 6.- Proceso según reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** los inductores (100) también serán alimentados con una corriente de calor (Ih) que consiste en una parte de corriente alterna y otra de corriente continua, para el calentamiento del material fundido (130).
- 40 7.- Proceso según la reivindicación 6, **caracterizado porque** la corriente de calor (Ih) tiene una parte de corriente alterna de al menos una parte porcentual fija, en específico de al menos 10%.
- 45 8.- Proceso según las reivindicaciones 6 o 7, **caracterizado porque** la parte de corriente alterna demuestra al menos dos frecuencias (f1, f2).
- 50 9.- Proceso según reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** la primera frecuencia (f1) y la segunda frecuencia (f2) tienen una diferencia de máximo un factor dado, específicamente el factor de 2 a 40.
- 10.- Proceso según reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** el primero y/o segundo conjunto de corrientes alternas desfasadas tienen varias corrientes alternas desfasadas no-equidistantes.
- 11.- Proceso según reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** la primera frecuencia (f1) y la segunda frecuencia (f2), así como la primera profundidad de penetración (d1) y la segunda profundidad de penetración (d2) cumplen con la siguiente fórmula, para los respectivos campos magnéticos generados con la primera o segunda frecuencia (f1, f2):

$$D < ED1.ED2. \ln(X) / (ED2 - ED1),$$

para la que

$$X = (FD1.ED2 / FD2.ED1) \text{ y}$$

D indica una distancia mínima fija respecto a la pared interior del crisol (120) para una de las fuerzas de Lorentz resultantes creadas por los campos de ondas progresivas (W1, W2).

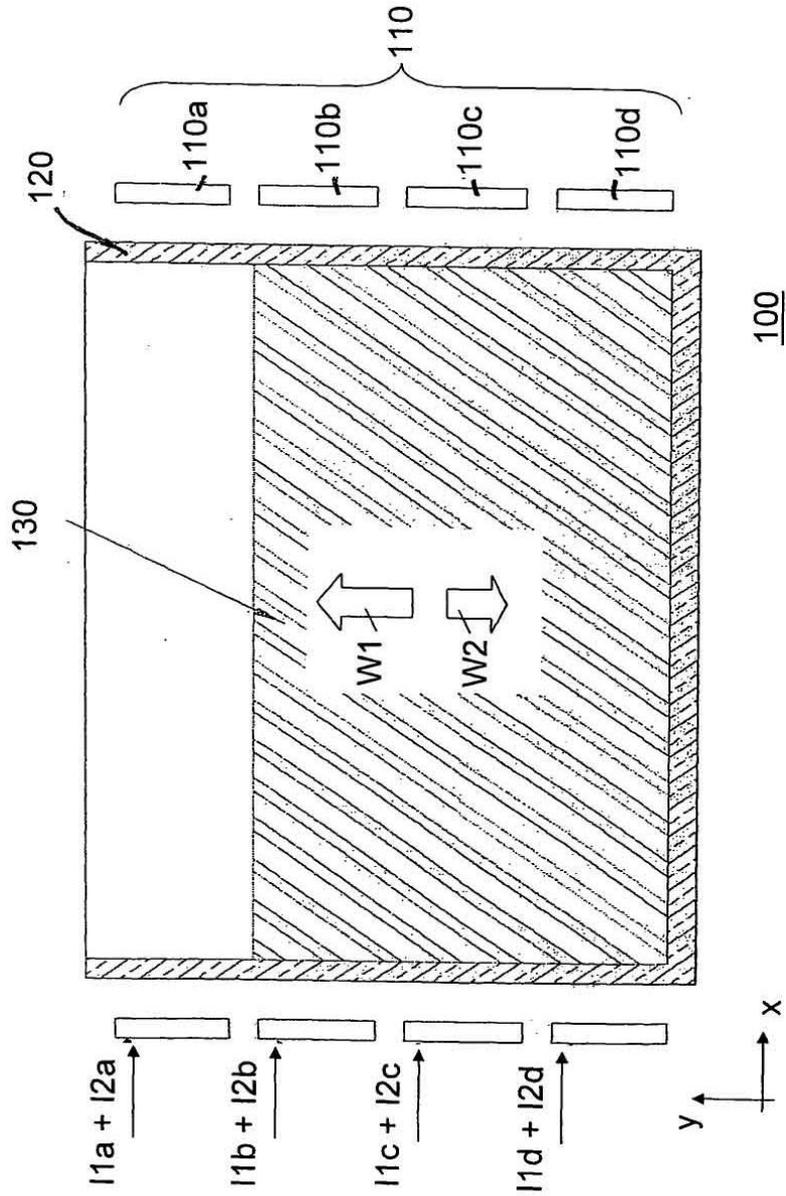


Fig. 1

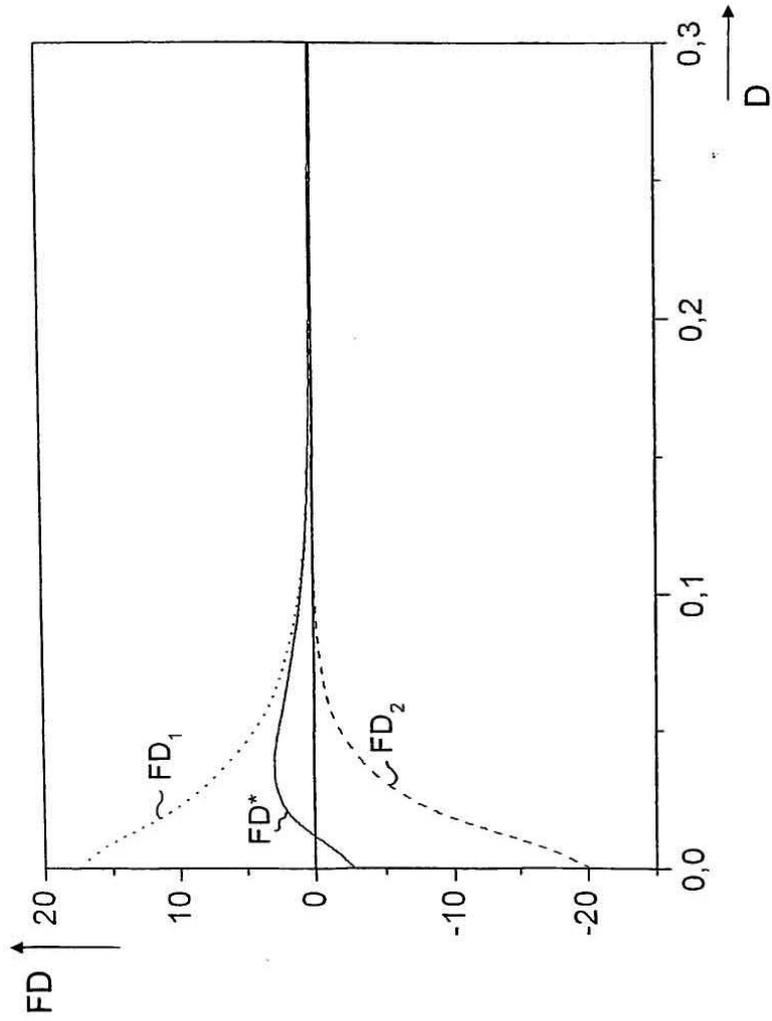


Fig. 2

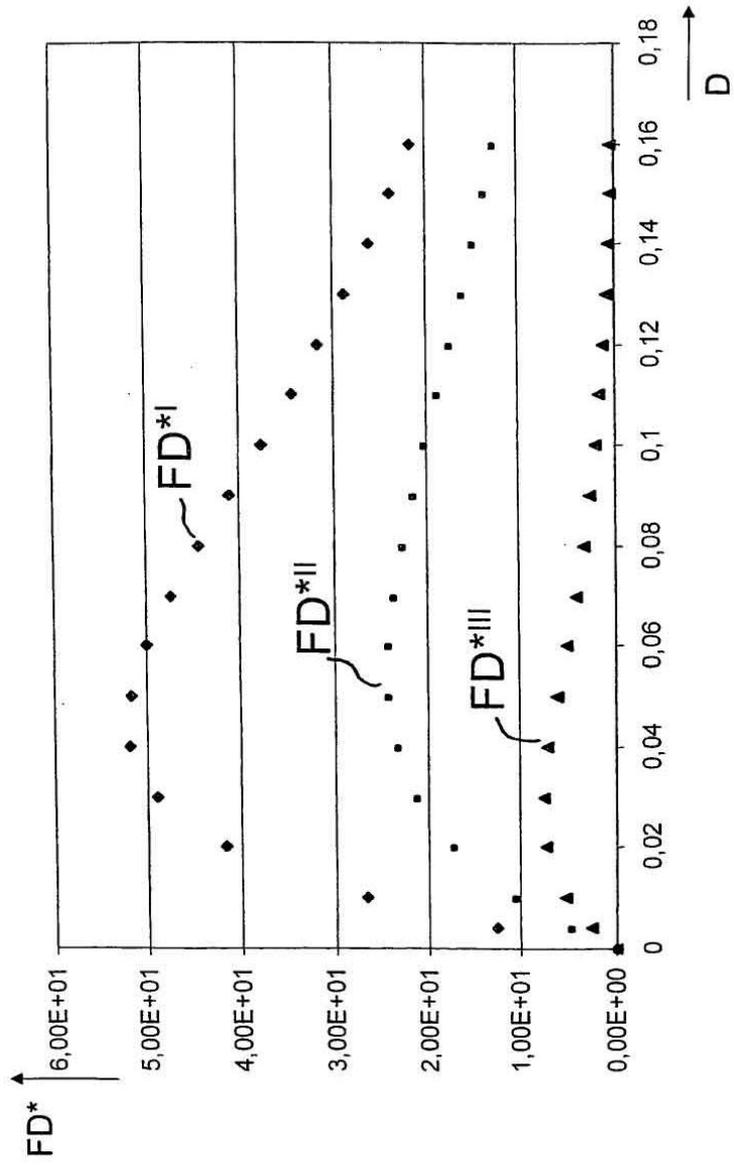


Fig. 3