

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
3. Juni 2010 (03.06.2010)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2010/060802 A2

- (51) Internationale Patentklassifikation: Nicht klassifiziert
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2009/065063
- (22) Internationales Anmeldedatum:
12. November 2009 (12.1 1.2009)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:
10 2008 059 521.7
28. November 2008 (28.1 1.2008) DE
- (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **SCHOTT SOLAR AG** [-/DE]; Hattenbergstrasse 10, 55122 Mainz (DE). **FORSCHUNGS-
VERBUND BERLIN E.V.** [-/DE]; Rudower Chaussee 17, 12489 Berlin (DE).
- (72) Erfinder; und
- (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **BÜLLESFELD, Frank** [DE/DE]; Uhlandstraße 46, 60314 Frankfurt (DE). **SAHR, Uwe** [DE/DE]; Hermann-Löns-Straße 45, 90411 Nürnberg (DE). **MILLER, Wolfram** [DE/DE]; Rheingaustraße 25, 12161 Berlin (DE). **RUDOLPH, Peter** [-/DE]; Helga-Hahnemann-Straße 56, 12529 Schönefeld (DE). **REHSE, Uwe** [DE/DE]; Havelkorso 69, 16515

Oranienburg (DE). **DROPKA, Natascha** [DE/DE]; HaIs-
kestraße 4, 12167 Berlin (DE).

(74) Anwalt: **2K PATENTANWÄLTE BLASBERG, KE-
WITZ & REICHEL PARTNERSCHAFT**; Corneliusstra-
ße 18, 60325 Frankfurt (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD FOR FREEZING A NONMETAL MELT

(54) Bezeichnung : VERFAHREN ZUM ERSTARREN EINER NICHTMETALL-SCHMELZE

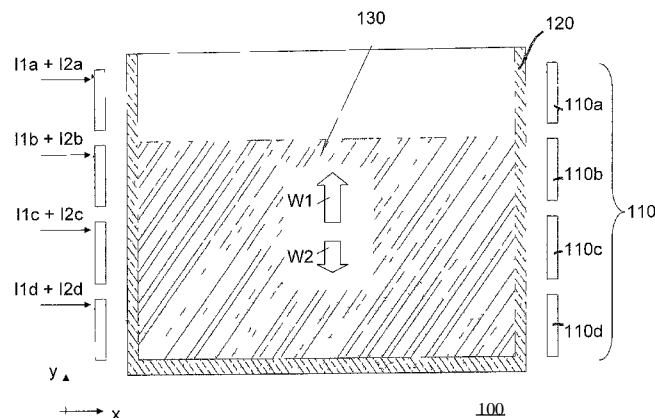


Fig. 1

(57) Abstract: Disclosed is a method for freezing a nonmetal melt (130) located in a crucible (120) that is arranged in an apparatus (100) which comprises a plurality of inductors (100) to generate magnetic fields. A first traveling magnetic field (W1) is generated in the melt (130) by feeding a first set of phase-displaced alternating currents (I1a, I2b, I3c, I4d) having a first frequency (f1). A second traveling magnetic field (W2) that travels against the direction of the first traveling magnetic field (W1) is generated in the melt (130) by feeding at least one second set of phase-displaced alternating currents (I2a, I2b, I3c, I4d) having a second frequency (f2). The inductors (100) are disposed on the crucible (120) in a vertical arrangement such that the generated alternating fields (W1, W2) travel through the melt (130) in a vertical direction (Y) and have a minimum flow rate along the wall of the crucible or vessel.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



WO 2010/060802 A2



SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, **Veröffentlicht:**
GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

— *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)*

Vorgeschlagen wird ein Verfahren zum Erstarren einer Nichtmetall-Schmelze (130), die sich in einem in der Vorrichtung (100) angeordnetem Tiegel (120) befindet, wobei die Vorrichtung (100) eine Vielzahl von Induktoren (100) zur Erzeugung von magnetischen Feldern aufweist. Durch Einspeisen eines ersten Satzes phasenverschobener und eine erste Frequenz (f1) aufweisender Wechselströme (I1a, I2b, I3c, I4d) wird ein erstes Wanderfeld (W1) in der Schmelze (130) erzeugt. Durch Einspeisen mindestens eines zweiten Satzes phasenverschobener und eine zweite Frequenz (f2) aufweisender Wechselströme (I2a, I2b, I3c, I4d) wird ein zweites Wanderfeld (W2) in der Schmelze (130) erzeugt, das dem ersten Wanderfeld (W1) entgegen gerichtet ist, wobei die Induktoren (100) an dem Tiegel (120) in einer sich vertikal erstreckenden Anordnung angeordnet sind, so dass die erzeugten Wechselfelder (W1, W2) die Schmelze (130) in vertikaler Richtung (Y) durchlaufen und an der Tiegel- bzw. Gefäßwand ein Strömungs-Kraft-Minimum aufweisen.

5

10

Verfahren zum Erstarren einer Nichtmetall-Schmelze

15

Die Erfindung betrifft ein Verfahren nach dem Oberbegriff des nebengeordneten Anspruchs. Insbesondere betrifft die Erfindung ein Verfahren zum gerichteten Erstarren einer Silizium-Schmelze .

20

In der Solarindustrie ist es üblich, Siliziumkristalle zur Herstellung von Solarzellen durch gerichtete Erstarrung herzustellen. Dazu wird das Ausgangsmaterial in granulärer Form in einem Quarzglasiegel geschmolzen, um dann unter Aufbringung eines vertikalen Temperaturgradienten gerichtet zu erstarren. Die so erhaltenen Blöcke, sog. Ingots, werden zu dünnen Siliziumscheiben zersägt, die in weiteren Verfahrensschritten zu Solarzellen verarbeitet werden können. Der Schmelztiegel ist üblicherweise mit einer Schicht aus Si_3N_4 überzogen (siehe z.B. Artikel „Transition metals in photovoltaic-grade ingot-cast multicrystalline Silicon : Assessing the role of impurities in Silicon nitride crucible lining material“ von T. Buonassis et al, veröffentlicht im

Journal of Crystal Growth, 287 (2006), Seiten 402-407) die die Wandung des Tiegels gegen die aggressive Silizium-Schmelze schützt und auch das Herauslösen des Ingots aus dem Tiegel nach dem Abkühlen erleichtert. Die in der Schmelze
5 vorherrschende konvektive Strömung wird im wesentlichen durch das Temperaturfeld bestimmt. Jedoch bestehen Möglichkeiten zur Beeinflussung der Strömungen insbesondere durch Anwendung von stationären oder instationären Magnetfeldern. Es ist an sich bekannt, ein Wandermagnetfeld zu erzeugen, welches die
10 Möglichkeit bietet, mit relativ schwachen Feldstärken einen starken Einfluß auf die Strömungen in der Schmelze zu nehmen. Eine Übersicht zur Anwendung von statischen und nicht-statischen Magnetfeldern in der Kristallzüchtung ist in dem Artikel „Travelling magnetic fields applied to bulk crystal
15 growth from the melt: The step from basic research to industrial scale“ von P. Rudolph, veröffentlicht im Journal of Crystal Growth, 310 (2008), Seiten 1298-1306.

Aus der Patentanmeldung DE 35 27 387 A1 ist ein Verfahren zum
20 elektromagnetischen Rühren metallischer Schmelzen bekannt, bei dem an dem Schmelztiegel befindliche Induktoren mit Drehströmen verschiedener Frequenzen gespeist werden, um magnetische Felder zu erzeugen, die sich als überlagernde Drehfelder in azimuthaler Richtung darstellen. Die dortige
25 Anordnung ist in Form einer Statorwicklung, wie sie vom Drehstrom-Motor her bekannt ist, vorgesehen, um in der horizontalen Ebene rotierende Drehfelder auszuprägen. Diese Maßnahmen eignen sich zwar für das elektromagnetische Rühren magnetischer Schmelzen, sie sind jedoch für ein Erstarren von
30 Nichtmetall-Schmelzen, das insbesondere in vertikaler Richtung erfolgen soll, eher ungeeignet.

Aus der Patentanmeldung DE 10 2006 020 234 A1 ist eine Vorrichtung in Gestalt eines Ofens sowie ein Verfahren zum Erstarren einer Nichtmetall-Schmelze bekannt. Dort wird ein Wanderfeld mit drei Leitungsschleifen erzeugt, die mit
5 phasenverschobenen Drehströmen gespeist werden. Die Leitungsschleifen bzw. Induktoren sind so angeordnet, dass sie im wesentlichen ein vertikal verlaufendes Wanderfeld erzeugen. Jedoch bildet ein so erzeugtes Wanderfeld, insbesondere am Randbereich des Schmelztiegels, eine starke
10 Lorentzkraft dichte aus. Dies hat eine hohe Geschwindigkeit der Schmelze am Tiegelrand zur Folge, die sich wiederum nachteilig, insbesondere erodierend, auf die Innenbeschichtung des Schmelztiegels auswirkt.

15 In der Patentanmeldung DE 103 49 339 A1 wird eine Kristallzüchtungsanlage mit einem Heizer beschrieben, der gleichzeitig einen Induktor zur Erzeugung eines Wandermagnetfeldes darstellt. Dabei wird der Induktor an eine Stromquelle für dreiphasigen Drehstrom angeschlossen und so
20 ein Wandermagnetfeld mit nur einer Frequenz erzeugt.

In der Patentanmeldung DE 101 02 126 A1 ist ein Verfahren zur Herstellung von Kristallen durch Ziehen aus der Schmelze unter Verwendung eines Wandermagnetfeldes einer Frequenz
25 beschrieben.

In der Patentanmeldung DE 10 2007 020 239 A1 wird eine Vorrichtung zur Herstellung von Kristallen aus elektrisch leitenden Schmelzen beschrieben, die eine Mehrspulenanordnung
30 als Heizeinrichtung enthält. Die Mehrspulenanordnung wird jedoch nur mit Wechselströmen einer Frequenz betrieben.

Aufgabe der Erfindung ist es demnach, die oben genannten Nachteile in vorteilhafter Weise zu überwinden. Insbesondere soll ein Verfahren der eingangs genannten Art derart verbessert werden, dass die Strömungsverteilung und das Erstarren einer Nichtmetall-Schmelze kontrolliert durchgeführt werden können.

Gelöst wird die Aufgabe durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1.

Demnach wird ein Verfahren zum Erstarren einer Nichtmetall-Schmelze vorgeschlagen, bei dem mittels einer Vielzahl von Induktoren magnetische Felder erzeugt werden, wobei die Induktoren mit einem ersten Satz phasenverschobener und eine erste Frequenz aufweisender Wechselströme versorgt werden, so dass durch Überlagerung von magnetischen Feldern ein erstes Wanderfeld in der Schmelze erzeugt wird, und mit mindestens einem zweiten Satz phasenverschobener und eine zweite Frequenz aufweisender Wechselströme versorgt werden, wobei durch Überlagerung der mit der zweiten Frequenz erzeugten magnetischen Felder ein zweites Wanderfeld in der Schmelze erzeugt wird, das dem ersten Wanderfeld entgegen gerichtet ist, und wobei die mindestens zwei erzeugten Wanderfelder gegensinnig die Schmelze vorzugsweise in vertikaler Richtung durchlaufen.

Dazu kann eine Vielzahl von Induktoren zur Erzeugung von sich überlagernden magnetischen Feldern vorgesehen werden, wobei die Induktoren mit mindestens zwei Sätzen phasenverschobener Wechselströme versorgt werden, die verschiedene Frequenzen aufweisen, um ein erstes Wanderfeld und mindestens ein zweites Wanderfeld in der Schmelze zu erzeugen, das dem ersten Wanderfeld entgegengerichtet ist, wobei die Induktoren

an dem Tiegel in einer sich vertikal erstreckenden Anordnung ausgeführt sind, so dass die erzeugten Wanderfelder die Schmelze gegensinnig in vertikaler Richtung durchlaufen und die radialen Feldanteile sich gegenseitig aufheben.

5

Durch diese Merkmalskombination bilden sich zwei entgegengesetzte Wanderfelder in vertikaler Richtung aus, was dazu führt, dass im Randbereich eine Lorentzkraftdichte vorherrscht, die zu einer geringeren Geschwindigkeit als im Volumenbereich der Schmelze führt. Durch Einstellung der Parameter, insbesondere durch Wahl des Verhältnisses beider Frequenzen, kann ein ausreichender Abstand zur Innenwand des Schmelztiegels definiert werden, an dem die maximale Lorentzkraftdichte vorherrscht. Nach diesem Prinzip können auch mehr als zwei sich in vertikaler Richtung überlagernder Wanderfelder erzeugt werden.

10

15

Vorzugsweise sind die Induktoren z.B. als Spulen, also als in horizontaler Richtung umlaufende Wicklungen, ausgebildet, wobei die Wicklungen in vertikaler Richtung separat übereinander oder auch in vertikaler Richtung ineinander verschachtelt angeordnet sein können. In diesem Zusammenhang können sowohl der Tiegel wie auch die Windungen und der Spuleninnenbereich bzw. -durchmesser einen rechteckförmigen Querschnitt aufweisen.

20

25

Vorzugsweise können die Induktoren auch mit einem aus Wechselstrom- und Gleichstromanteilen bestehenden Heizstrom zum Heizen der Schmelze versorgt werden. In diesem Zusammenhang ist es für die effektive Erzeugung der Wanderfelder notwendig, dass der Heizstrom einen Wechselstromanteil von mindestens einem vorgebbaren Prozentsatz, insbesondere von mindestens 10%, aufweist.

30

Vorteilhaft ist es auch, wenn die erste Frequenz und die zweite Frequenz sich höchstens um einen vorgebbaren Faktor, insbesondere um den Faktor 2-40, voneinander unterscheiden.

5 Das Verhältnis der Frequenzen bzw. der Faktor kann prozessabhängig, z.B. in Abhängigkeit des Kristallisationsgrades eingestellt werden.

10 Bevorzugt können auch der erste und/oder zweite Satz der phasenverschobenen Wechselströme mehrere zueinander nicht-äquidistant phasenverschobene Wechselströme darstellen.

15 Die Erfindung ist insbesondere geeignet zum Einsatz in einen Schmelzofen bzw. Kessel für Silizium-Schmelzen. In diesem Zusammenhang kann der Schmelztiegel mit einer Schutzschicht an der Innenwand, insbesondere einer Schicht aus Si_3N_4 , überzogen und als Quarzglasiegel ausgebildet sein.

20 Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren können bevorzugte Parameter so eingestellt werden, dass die erste Frequenz und die zweite Frequenz sowie eine erste Eindringtiefe und eine zweite Eindringtiefe für die jeweils erzeugten magnetischen Felder folgende Gleichung erfüllen:

25
$$D < \frac{ED1 \cdot ED2 \cdot \ln(x)}{ED2 - ED1} \quad , \quad \text{wobei} \quad x = \frac{FD1 \cdot ED2}{FD2 \cdot ED1} \quad \text{ist.}$$

Die Eindringtiefe ED ist der Abstand D vom Tiegelrand, bei dem die Lorentzkraftdichte FD auf $1/e \cdot FD$ abgefallen ist.

30 Nachfolgend wird die Erfindung und die sich daraus ergebenden Vorteile im Detail anhand von Ausführungsbeispielen und unter Bezugnahme auf die beiliegenden Zeichnungen beschrieben, wobei :

Figur 1 schematisch den Aufbau einer für die Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens geeigneten Vorrichtung zum Erstarren einer Nicht-Metallschmelze darstellt;

5

Figur 2 ein Funktionsdiagramm mit dem Verlauf von Lorentzkraftdichten in Abhängigkeit vom Abstand zur Schmelztiegelwand darstellt; und

10 Figur 3 ein Funktionsdiagramm mit dem Verlauf von Lorentzkraftdichten gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren darstellt.

Die Figur 1 zeigt in schematischer Darstellung eine
15 Vorrichtung 100 zum Erstarren einer Nicht-Metallschmelze 130, die sich in einem Tiegel 120 befindet. Die Schmelze ist beispielsweise eine Silizium-Schmelze und der Tiegel 120 stellt einen, hier beispielsweise rechteckigen, Quarzglas-
20 tiegel dar. Von außen sind mehrere Induktoren 110 um den Tiegel 120 angeordnet, um durch Einspeisung von Wechselströmen magnetische Felder in die Schmelze 130 zu induzieren, so dass mindestens zwei überlagernde Wanderfelder $W1$ und $W2$ sich entgegengesetzt zueinander in vertikaler Richtung Y bewegen. Beispielsweise sind vier Induktoren 110a
25 bis 110d in vertikaler Richtung Y übereinanderliegend angeordnet und werden mit einem ersten Satz phasenverschobener Wechselströme $I1a - I1d$ sowie mit einem zweiten Satz phasenverschobener Wechselströme $I2a - I2d$ gespeist. Der erste Satz phasenverschobener Wechselströme
30 wird mit einer ersten Frequenz $f1$ eingespeist, die beispielsweise 200 Hz beträgt. Der zweite Satz phasenverschobener Wechselströme wird mit einer zweiten Frequenz $f2$ eingespeist, die beispielsweise 20 Hz beträgt.

Wie anhand der Figur 2 erläutert wird, ergibt sich durch Überlagerung der so erzeugten Wechselfelder $W1$ und $W2$ eine entsprechende Überlagerung von Lorentzkraftdichten $FD1$ mit
5 $FD2$ zu einer resultierenden Lorentzkraftdichte FD^* . Die erste Lorentzkraftdichte $FD1$ wird über die Einspeisung des ersten Satzes von Wechselströmen $I1a - I1d$ erzeugt, wobei im Randbereich des Tiegels, d. h. $D = 0$, sich eine relativ hohe Lorentzkraftdichte einstellt. Durch Einspeisung des zweiten
10 Satzes phasenverschobener Wechselströme $I2a - I2d$ ergibt sich ein Verlauf der Lorentzkraftdichte $FD2$, der im Randbereich, d. h. $D = 0$, einen negativen Wert aufweist. Durch Überlagerung von $FD1$ und $FD2$ ergibt sich somit ein Lorentzkraftdichte-Verlauf FD^* , der im Randbereich einen abgesenkten Wert
15 aufweist. Durch Einstellung der Parameter, insbesondere der Frequenzen $f1$ und $f2$ kann erfindungsgemäß erreicht werden, dass im Randbereich die resultierenden Strömungsgeschwindigkeiten sehr gering und idealerweise zu Null wird.

20 Die Figur 3 zeigt den Verlauf der resultierenden Lorentzkraftdichte FD^* bei verschiedenen eingestellten Parametern. Die obere Kurve $FD^{*'}$ zeigt den Verlauf der Lorentzkraftdichte, wenn die erste Frequenz $f1$ zu 20 Hz gewählt wird und das entsprechende Wanderfeld $W1$ sich von
25 unten nach oben erstreckt und wenn die zweite Frequenz $f2$ zu 400 Hz gewählt wird, wobei sich das entsprechende Wanderfeld $W2$ von oben nach unten erstreckt. Die zweite Kurve $FD^{*''}$ ergibt sich, wenn $f1$ gleich 20 Hz beträgt und $W1$ von unten nach oben verläuft sowie wenn $f2$ gleich 200 Hz ist und $W2$ von
30 oben nach unten verläuft. Die dritte Kurve $FD^{*'''}$ ergibt sich, wenn $f1$ gleich 200 Hz beträgt und von oben nach unten verläuft und wenn $f2$ gleich 400 Hz beträgt und von unten nach oben verläuft.

Wie sich aus einem Vergleich der dargestellten Kurvenverläufe ergibt, ist in allen drei dargestellten Beispielen die resultierende Lorentzkraftdichte FD^* im Randbereich, d.h. $D = 0$, deutlich abgesenkt und beträgt in etwa 0 N/m^3 . Durch die Wahl des Verhältnisses f_1 zu f_2 verschiebt sich das Maximum der Lorentzkraftdichte in das Innere der Schmelze hinein, d.h. $D > 0$. Die zweite Kurve $FD^{*''}$ weist dabei eine maximale Lorentzkraftdichte im Bereich $D = 0,06$ auf. Bei den anderen Kurvenverläufen liegt das Maximum bei einem geringeren Abstand. Der Kurvenverlauf $FD^{*'}$ weist ein Maximum im Bereich von $D = 0,04$ auf und der Kurvenverlauf $FD^{*'''}$ weist ein Maximum im Bereich $D = 0,025$ auf. Demnach kann das Maximum der Lorentzkraftdichte besonders weit ins Innere der Schmelze hinein verschoben werden, wenn eine der beiden Frequenzen, hier f_1 , relativ gering ist und beispielsweise 20 Hz beträgt und wenn die andere Frequenz, hier f_2 , nicht sehr viel größer ist, also z.B. nicht größer als das 40-fache von f_1 ist.

Durch die Wahl der Frequenzen f_1 und f_2 kann erreicht werden, dass die Strömungsgeschwindigkeit am Tiegelrand recht klein ist und nicht größer als 0 bis 1 cm/sec. beträgt. Auch kann erreicht werden, dass die Strömungsgeschwindigkeit zum inneren der Schmelze hin, etwa im Abstand $D = 1 \text{ cm}$, größer als 0,01 bis 2 cm/sec. liegt. Der Verlauf der Lorentzkraftdichte und der sich daraus ergebenden Strömungsgeschwindigkeit bzw. Beeinflussung der Konvektion kann insbesondere durch die Parametrisierung der Frequenzen aus Ausbreitungsrichtungen, Phasenverschiebungen, Amplituden und Geometrien der Induktoren optimal eingestellt werden. Für die Erzeugung der Wanderfelder müssen die Induktoren mit relativ hohen Strömen von beispielsweise 200 A gespeist

werden, wodurch wegen Ohmscher Verluste eine Erwärmung der Induktoren entsteht. Anstatt diese Wärme über Kühlmaßnahmen abzuleiten, kann es auch vorgesehen sein, dass die Induktoren gleichzeitig als Heizelemente zur kontrollierten Erhitzung der Schmelze eingesetzt werden. Hierbei ist es von Vorteil, wenn zusätzlich zu den Wechselströmen, welche die Wanderfelder erzeugen, auch noch ein Heizstrom eingespeist wird, der nur Gleichstrom aufweist. Das Verhältnis von Wechselstromanteilen zu Gleichstromanteilen kann prozessbedingt eingestellt werden.

Zur Erzeugung der beschriebenen Funktionsverläufe der Lorentzkraftdichten (siehe Fig. 2 und 3) ist vor allem die Parametrisierung der Wechselströme $I_{1a} - H_d$ sowie $I_{2a} - I_{2d}$ erforderlich. Dabei hat sich gezeigt, dass zur Erzeugung eines Maximums der Lorentzkraftdichte im Inneren der Schmelze folgende Bedingung erfüllt sein muss:

$$FD_1/FD_2 > ED_1/ED_2 \quad \text{und} \quad ED_2 > ED_1.$$

20

Dabei bedeutet FD_1 bzw. FD_2 der Betrag der Lorentzkraft an der Tiegelwand sowie ED_1 bzw. ED_2 die Eindringtiefe des Magnetfeldes.

Der Abstand der maximal auftretenden Lorentzkraft von der Tiegelwand ergibt sich dabei aus folgender Beziehung:

$$D^* < ED_1 \cdot ED_2 / (ED_2 - ED_1) \cdot \ln (FD_1 \cdot FD_2 / FD_2^2 \cdot ED_1),$$

wobei D^* den Mindestabstand von der Wand darstellt.

Für den Einsatz der Erfindung beim Erschmelzen und Erstarren von Silarsilizium in einem Quarzglasiegel hat es sich als

besonders vorteilhaft erwiesen, wenn das Maximum des Kraftfeldes einen Abstand von etwa 0,1 cm bis 40 cm von der Tiegelwand hat, d.h. $D = 0,1$ bis 40 cm.

5 Bei der Bestromung der Induktoren bzw. Wicklungen kann auch vorgesehen sein, dass die Phasenverschiebung zwischen den einzelnen Wicklungen nicht-äquidistant ist. Denn die vertikale Anordnung der Induktoren stellt im wesentlichen einen Teilabschnitt eines sich in vertikaler Richtung
10 erstreckenden Linearmodus dar, der abschnittsweise mit verschiedenartig phasenverschobenen Strömen bestromt werden kann.

Anhand der nachfolgenden Tabelle 1 sind für ein erstes
15 Ausführungsbeispiel die Parameter angegeben.

Tabelle 1

Wicklung	110a	110b	110c	110d
f1 in Hz	200	200	200	200
f2 in Hz	20	20	20	20
FD1 max. rel. Einheiten	0,1	0,1	0,1	0,1
FD2 max. rel. Einheiten	0,053	0,053	0,053	0,053
Phasen- verschiebung von I1a-d	0	90	180	270
Phasen- verschiebung von I2a-d	0	-90	-180	-270

Die Angaben von FD1 und FD2 sind relative Angaben, die sich
20 auf eine Bezugsgröße von $X \text{ N/m}^3$ beziehen. Das mit den

angegebenen Parametern hergestellte Silizium und die daraus erzeugten Solarzellen zeigen einen deutlich höheren Wirkungsgrad als übliche Solarzellen. Außerdem läßt sich der Ingot leichter von dem Quarzglasiegel lösen. Es kommt zu
 5 deutlich weniger Klebestellen des Ingots an dem Quarzglasiegel als dies herkömmlicher Weise der Fall ist. Zusätzlich wird die Schmelze deutlich weniger mit Komponenten aus dem Tiegelmateriale oder der Beschichtung verunreinigt. Der Ingot enthält daher weniger Ausscheidungen von
 10 Fremdphasen.

Für ein weiteres Beispiel wird in der Tabelle 2 die Parametrisierung wie folgt angegeben:

15 **Tabelle 2**

Wicklung	110a	110b	110c	110d
f1 in Hz	100	100	100	100
f2 in Hz	20	20	20	20
I1 (a-d) in A	200	200	200	200
I2 (a-d) in A	200	200	200	200
FD1 max. rel. Einheiten	20	20	20	20
FD2 max. rel. Einheiten	17,5	17,5	17,5	17,5
Phasen- verschiebung von I1 (a-d)	0	90	180	270
Phasen- verschiebung von I2 (a-d)	0	-120	-240	-360

Die sich hieraus ergebende Lorentzkraftdichte ist in der Figur 2 dargestellt.

Bei den erfindungsgemäß erzeugten Magnetfeldern nimmt also die resultierende Lorentzkraftdichte vom Rand der Schmelze her zu bis zu einem Maximum, das sich in einem Abstand D^* von dem Randbereich befindet. Der Verlauf der Lorentzkraftdichte und die Lage des Maximums kann insbesondere durch Wahl des Verhältnisses zwischen der ersten Frequenz f_1 und der zweiten Frequenz f_2 eingestellt werden. Die erfindungsgemäße Anordnung ist auch geeignet, um bei rechteckförmigen bzw. quadratischen Schmelztiegeln eingesetzt zu werden. Die Wicklungen können in diesem Fall ebenfalls rechteckförmig am Rande des Tiegels verlaufen, ohne dass hierdurch die Funktionsweise der Magnetfelderzeugung nachteilig beeinflusst wird. Die Anordnung der Induktoren in vertikaler Richtung kann auch verschachtelt ineinander gestaltet sein. Vorzugsweise wird ein Satz von Induktoren eingesetzt, der mit beiden Frequenzen bestromt wird. Alternativ kann auch für jede Frequenz ein eigener Satz von Induktoren vorgesehen werden. Außerdem können die Induktoren auch als Heizer eingesetzt werden. Dazu wird auch ein Gleichstrom eingespeist, wobei der Wechselstromanteil mit f_1 und/oder f_2 mindestens 10% beträgt. Insgesamt ergibt sich eine sehr effektive Vorrichtung zum Erstarren von Nichtmetall-Schmelzen, insbesondere von Silizium-Schmelzen, wobei ein kontrolliertes vertikales Erstarren der Schmelze ermöglicht wird.

Bezugs zeichenliste

5	100	Vorrichtung (hier: Schmelzofen) zur Durchführung des Verfahrens
	110	Induktoren (horizontal verlaufende Wicklungen)
	110a - 100d	Wicklungen der Induktoren
	120	Tiegel, Hier Quarzglasiegel mit Innenbeschichtung
	130	Schmelze, hier Silizium-Schmelze
10		
	IIa- H d	erster Satz phasenverschobner Wechselströme
	I2a- I2d	erster Satz phasenverschobner Wechselströme
	W1, W2	erstes bzw. zweites Wandlerfeld (gegenfaufig)
15	FD	Lorentzkraftdichte (in N/m^3)
	FD1, FD2	Lorentzkraftdichte aufgrund der einzelnen Wechself eider
	FD*	resultierende Lorentzkraftdichte (durch Überlagerung) ;
	FD*', FD*', FD*''	verschiedene Verläufe
20	D	Abstand von Innenwand des Tiegels (in m)
	ED	Eindringtiefe des Magnetfeldes

Patentansprüche

1. Verfahren zum Erstarren einer Nichtmetall-Schmelze
5 (130), die sich in einem Tiegel (120) befindet, indem
mittels einer Vielzahl von Induktoren (100)
magnetischen Felder erzeugt werden, wobei die
Induktoren (100) mit einem ersten Satz
phasenverschobener und eine erste Frequenz (f1)
10 aufweisender Wechselströme (IIa, IIb, IIc, IId)
gespeist werden, so dass durch Überlagerung von
magnetischen Feldern ein erstes Wanderfeld (W1) in der
Schmelze (130) erzeugt wird, und mit mindestens einem
zweiten Satz phasenverschobener und eine zweite
15 Frequenz (f2) aufweisender Wechselströme (I2a, I2b,
I2c, I2d) versorgt werden,
dadurch gekennzeichnet, dass
durch Überlagerung der mit der zweiten Frequenz (f2)
erzeugten magnetischen Feldern ein zweites Wanderfeld
20 (W2) in der Schmelze (130) erzeugt wird, das dem ersten
Wanderfeld (W1) entgegen gerichtet ist, wobei die zwei
erzeugten Wanderfelder (W1, W2) die Schmelze (130) in
einer im wesentlichen vertikalen Richtung (Y)
durchlaufen .
- 25
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass
die Induktoren (100) an dem Tiegel (120) in einer sich
vertikal erstreckenden Anordnung angeordnet werden, so
dass die zwei erzeugten Wanderfelder (W1, W2) sich in
30 der Schmelze (130) im wesentlichen in vertikaler
Richtung (Y) bewegen.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass ein Satz von Induktoren (100) an dem Tiegel (120) angeordnet wird, der mit den die erste und die zweite Frequenz (f_1 , f_2) aufweisenden Wechselströmen (IIa, Hb, Hc, Hd; I2a, I2b, I2c, I2d) gespeist wird.
- 5
4. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass zwei Sätze von Induktoren an dem Tiegel angeordnet werden, von denen der eine Satz einer mit den die erste Frequenz aufweisenden Wechselströmen gespeist wird und der andere Satz mit den die zweite Frequenz aufweisenden Wechselströmen gespeist wird.
- 10
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass mehr als zwei sich überlagernde und im wesentlichen in vertikaler Richtung bewegende Wanderfelder erzeugt werden.
- 15
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Induktoren (100) auch mit einem aus Wechselstrom- und Gleichstromanteilen bestehenden Heizstrom (I_h) zum Heizen der Schmelze (130) versorgt werden.
- 20
7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Heizstrom (I_h) einen Wechselstromanteil von mindestens einem vorgebbaren Prozentsatz, insbesondere von mindestens 10%, aufweist.
- 25
8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, dass der Wechselstromanteil die mindestens zwei Frequenzen (f_1 , f_2) aufweist.
- 30

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass die erste Frequenz (f1)
und die zweite Frequenz (f2) sich höchstens um einen
vorgebaren Faktor, insbesondere um einen Faktor von 2
bis 40, voneinander unterscheiden.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass der erste und/oder zweite
Satz phasenverschobener Wechselströme mehrere
zueinander nicht-äquidistant phasenverschobene
Wechselströme aufweist.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass die erste Frequenz (f1)
und die zweite Frequenz (f2) sowie eine erste
Eindringtiefe (d1) und zweite Eindringtiefe (d2) für
die jeweils durch die mit der ersten bzw. zweiten
Frequenz (f1, f2) erzeugten magnetischen Felder
folgende Gleichung erfüllen:

$D < ED1 - ED2 - \frac{In(x)}{(ED2 - ED1)}$, wobei

$X = (FD1 \cdot E \cdot D2 / FD2 \cdot ED1)$ ist und

D einen vorgebbaren Mindestabstand zur Innenwandung
des Tiegels (120) für eine von den resultierenden
Wanderfeldern (w1, w2) erzeugten Lorentzkraft angibt.

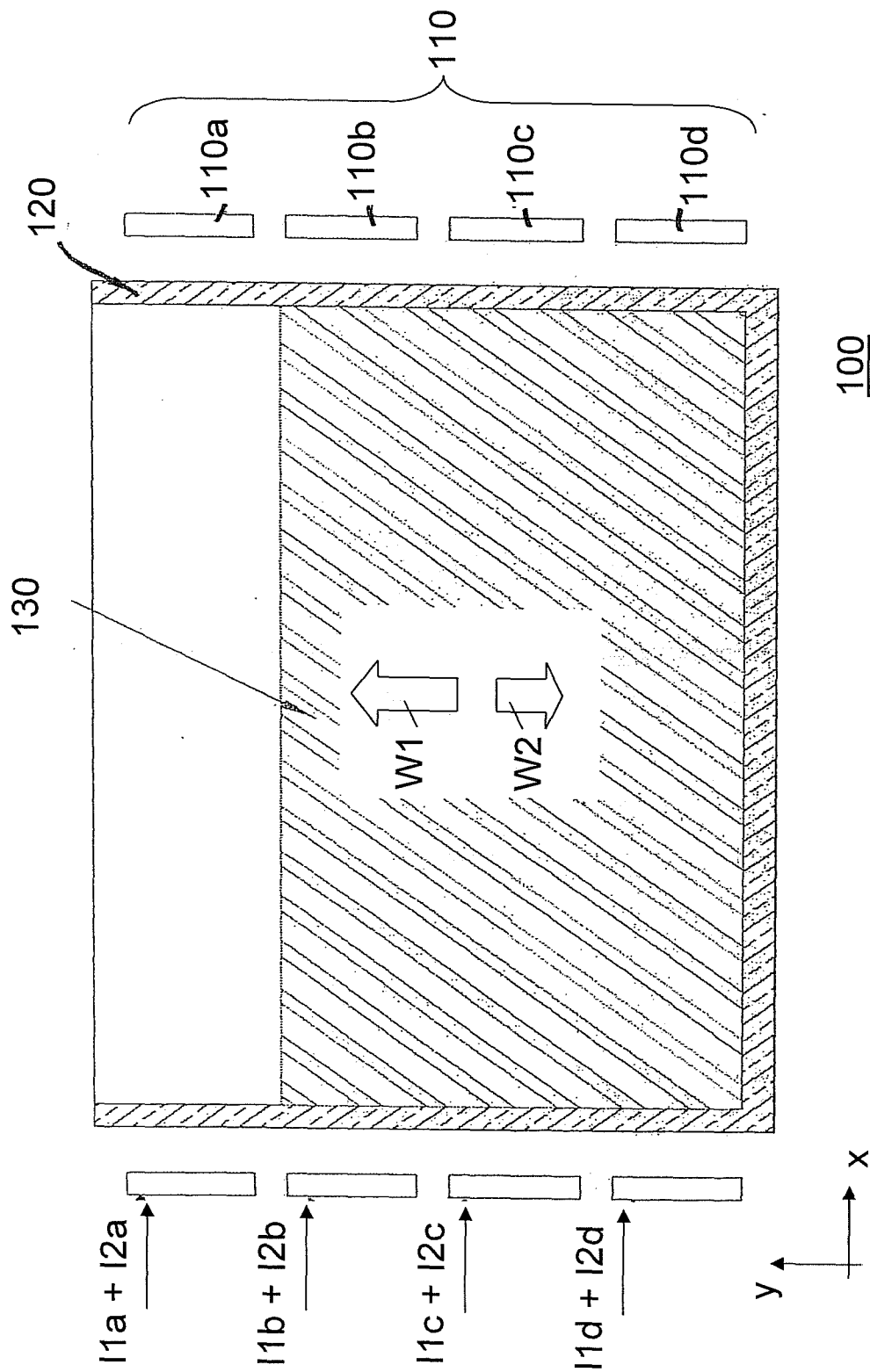


Fig. 1

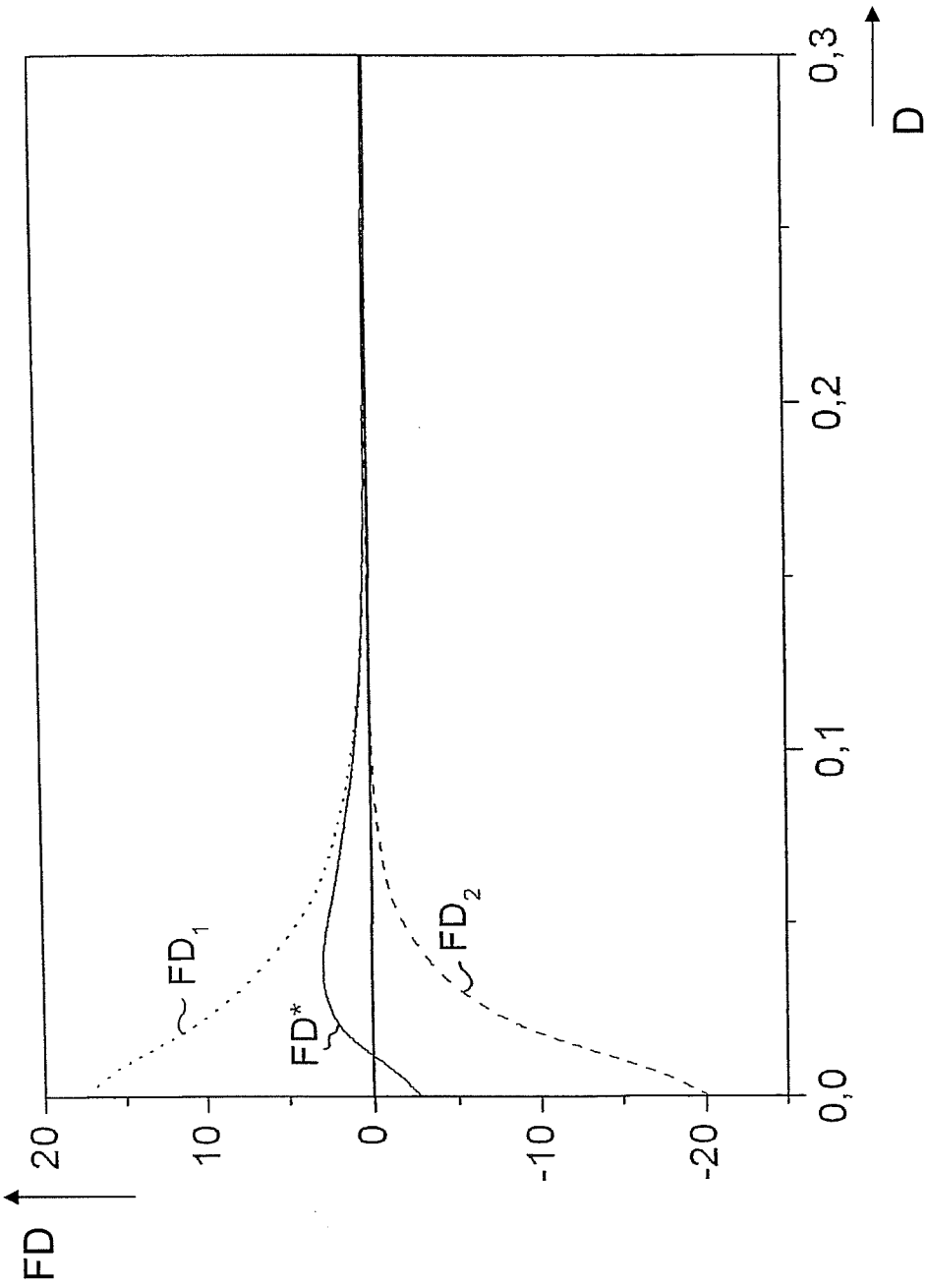


Fig. 2

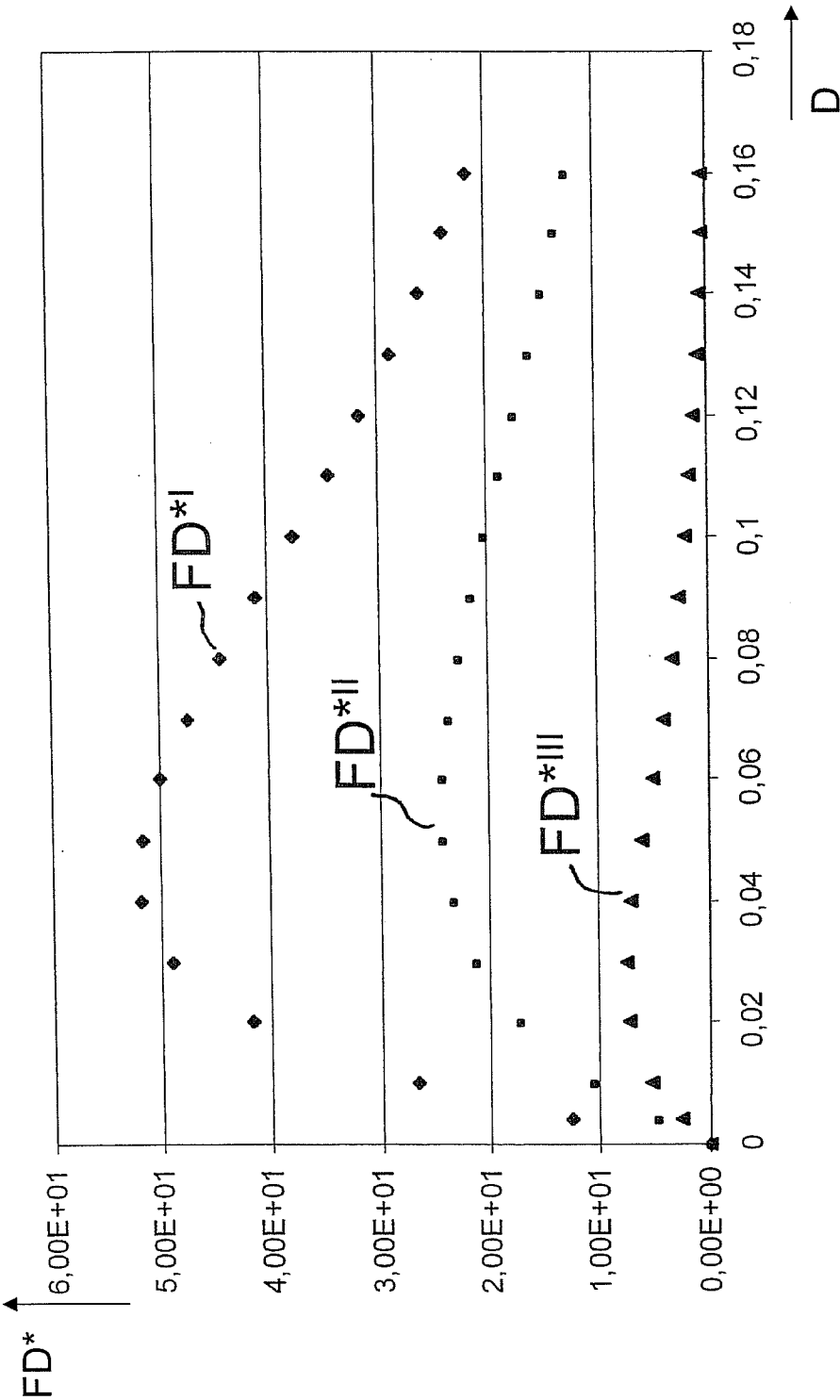


Fig. 3