



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2007 028 548 A1** 2008.12.24

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2007 028 548.7**

(22) Anmeldetag: **18.06.2007**

(43) Offenlegungstag: **24.12.2008**

(51) Int Cl.⁸: **C30B 30/04** (2006.01)

C30B 11/00 (2006.01)

C30B 15/22 (2006.01)

C30B 15/14 (2006.01)

C30B 17/00 (2006.01)

(71) Anmelder:
Forschungsverbund Berlin e.V., 12489 Berlin, DE

(74) Vertreter:
Anwaltskanzlei Gulde Hengelhaupt Ziebig & Schneider, 10179 Berlin

(72) Erfinder:
Frank-Rotsch, Christiane, Dr., 16727 Oberkrämer, DE; Rudolph, Peter, Prof. Dr., 12529 Schönefeld, DE; Klein, Olaf, Dr., 13125 Berlin, DE; Lange, Ralph-Peter, Dipl.-Ing., 10318 Berlin, DE; Nacke, Bernard, Prof. Dr.-Ing., 31303 Burgdorf, DE

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht gezogene Druckschriften:

DE10 2007 020239 A1

DE 103 49 339 A1

DE 103 39 792 A1

DE 101 02 126 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

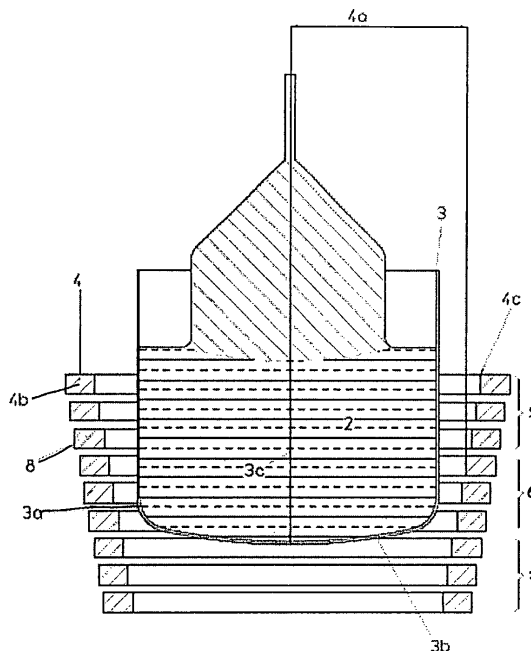
Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Vorrichtung und Verfahren zur Herstellung von Kristallen aus elektrisch leitenden Schmelzen**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Herstellung von Kristallen aus elektrisch leitenden Schmelzen, mindestens aufweisend einen in einer Züchtungskammer (1) angeordneten, eine Schmelze (2) enthaltenden Tiegel (3) mit einem Tiegelboden (3b), eine den Tiegel umgebende Heizeinrichtung (4), welche als Mehrspulenanordnung von übereinander angeordneten Spulen (5), (6), (7) ausgeführt ist und zur gleichzeitigen Erzeugung eines magnetischen Wanderfeldes dient, wobei die Spulen elektrisch mit mindestens einer außerhalb der Züchtungskammer (1) angeordneten Energieversorgungseinrichtung (14) über durch die Züchtungskammer (1) geführte Spulenschlüsse (10), (11), (12), (13), (14) elektrisch verbunden sind.

Es ist vorgesehen, dass Windungen (8) der Mehrspulenanordnung einen Abstand (4a) von einer gedachten Tiegelmittelachse (3c) zum Innenrand (4c) der Windungen (8) aufweisen, der mindestens bei einer Windung (8) verschieden von den übrigen Windungen (8) bei gleichem oder verschiedenen Windungsquerschnitten (4b) ist.

Weiterhin ist ein Verfahren zur Herstellung von Kristallen aus elektrisch leitenden Schmelzen vorgesehen.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Herstellung von Kristallen aus elektrisch leitenden Schmelzen.

[0002] Bei der Züchtung von Kristallen aus der Schmelze ist die Schmelzströmung von entscheidender Bedeutung. Sie beeinflusst zum einen die Form der Phasengrenze zwischen Kristall und Schmelze und zum anderen das zeitliche Verhalten der Temperatur in der Schmelze, die Temperaturosillation, und die Dotierstoffverteilungen. Die auftretenden Strömungen in der Schmelze sind dabei örtlich inhomogen verteilt. Das Strömungsfeld in der Schmelze wird durch die thermische Auftriebskonvektion, Maragonikonvektion sowie durch die Kristall- und Tiegelrotation bedingt.

[0003] Als ein zentrales wissenschaftlich-technisches Problem, das es zu lösen gilt, ist die Eindämmung der mit wachsendem Schmelzvolumen stark zunehmender Auftriebskonvektion, deren Instationarität sich negativ auf die strukturellen und physikalischen Eigenschaften der wachsenden Kristalle auswirkt [vgl. D. T. J. Hurle, Handbook of Crystal Growth, Vol. 2a-b, Elsevier, North-Holland 1994].

[0004] Die Kontrolle der Schmelzkonvektion ermöglicht Temperaturfluktuationen in der Schmelze zu reduzieren und die Form der Phasengrenze zu optimieren. Bisher wird die Schmelzkonvektion insbesondere durch die Wahl der Rotationsraten von Tiegel und Kristall beeinflusst. Als eine weitere wirksame technische Gegenmaßnahme haben sich die Anwendung magnetischer Felder erwiesen [G. Müller in: Theoretical and Technological Aspects of Crystal Growth, Ed. R. Fornari and C. Paorici, Trans. Tech. Publ., Zuerich 1998, p. 87]. Über die Erzeugung von Lorentzkräften können Strömungsanteile in elektrisch leitenden Schmelzen gedämpft oder verstärkt werden. Es sind verschiedene Vorgehensweisen bekannt, um den Wärme- und Stofftransport in der Schmelze zu beeinflussen. In US 2002/0092461 A1 wird eine Vorrichtung zur Kristallzüchtung beschrieben, bei der die Magnetfelder in außerhalb der Züchtungsanlage angebrachten Spulen erzeugt werden.

[0005] Bekannt sind des weiteren Heizeranordnungen, die gleichzeitig Wärme und ein longitudinales magnetisches Wanderfeld erzeugen. So wird in DE 101 02 126 A1 auf eine rotationssymmetrische Heizeranordnung verwiesen, die simultan als spiralförmiger Mehrphaseninduktor ausgebildet ist.

[0006] In DE 103 49 339 A1 wird vorgeschlagen, innerhalb der Züchtungskammer eine Heizeinrichtung in Form von übereinander angeordneten Spulen zu verwenden. Die dort beschriebene Heizeinrichtung dient einerseits der Erzeugung eines für die Kristallzüchtung erforderlichen Temperaturfeldes und zugleich der Erzeugung von wandernden Magnetfeldern. Die als Mehrspulenanordnung aufgebaute Heizeinrichtung umschließt den Tiegel und die darin enthaltene Schmelze zylinderförmig. Die in DE 103 49 339 A1 beschriebene Spulenanordnung weist drei Spulensegmente auf, die an eine Drei-Phasen-Wechselstromquelle angeschlossen werden. Durch die Spulen fließt jeweils ein phasenverschobener Strom, wodurch ein auf- oder abwärts wanderndes Magnetfeld erzeugt wird. Dieses induziert in die Schmelze elektrische Ströme, die auf Grund des vorhandenen Magnetfeldes Lorentzkräfte in der elektrisch leitenden Schmelze hervorrufen. Durch diese soll die Konvektion in der Schmelze beeinflusst werden.

[0007] Nachteilig an der Vorrichtung in DE 103 49 339 A1 ist jedoch, dass sich in der Schmelze ein Kraffeld entsprechend der zylindrischen Form der Heizeinrichtung mit konstantem Querschnitt und konstantem Durchmesser einstellt. In diesem Fall befindet sich die maximal erzeugte Lorentzkraftdichte stets im radialen Randbereich des Tiegels und nimmt zum Tiegelininneren ab. Die Position des Maximums des Kraffeldes wird durch die Position des Tiegels in der Kristallzüchtungsanlage bestimmt. Es hat sich jedoch gezeigt, dass sich u. a. bei der Züchtung nach dem Czochralski-Verfahren störende Auftriebsströmungen unter dem Kristall ausbilden, die sog. Proudman-Taylor-Instabilitäten. Diese Auftriebsströmungen können mit der oben beschriebenen Vorrichtung nicht beeinflusst werden. Weiterhin erlaubt ein gleichförmiger zylindrischer Spulenaufbau, d. h. eine Heizeinrichtung deren Spulen einen konstanten Durchmesser aufweisen, sowie eine gleichmäßige Stromspeisung keine Variation der Form der wandernden Magnetfelder und der davon erzeugten Lorentzkraffelder.

[0008] In einer Veröffentlichung von Thomas Wetzel „Die Schmelzströmung im Si-Czochralski-Prozess unter dem Einfluss elektromagnetischer Felder“, in: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 9, Nr. 328, wird vorgeschlagen, unter dem Tiegelboden eine wechselstromdurchflutete Spule („Bodeninduktor“) zur Beeinflussung der Schmelzkonvektion anzubringen.

[0009] Nachteilig hierbei ist, dass der Bodeninduktor nicht an die anderen Heizelemente gekoppelt ist.

[0010] Aufgabe der Erfindung ist es, eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Herstellung von Kristallen aus elektrisch leitenden Schmelzen bereitzustellen, bei der Temperaturfluktuationen in der Schmelze deutlich reduziert und die Kristallqualität verbessert wird. Weiterhin ist es Aufgabe der Erfindung, den Stoff- und Wärmetransport in der Schmelze zu verbessern.

[0011] Die Aufgabe wird gelöst mit einer Vorrichtung und einem Verfahren gemäß den Merkmalen des Anspruches 1 und des Anspruches 14.

[0012] Vorteilhafte Ausgestaltungen sind in den Unteransprüchen enthalten.

[0013] So ist die Vorrichtung zur Herstellung von Kristallen aus elektrisch leitenden Schmelzen, mindestens aufweisend einen in einer Züchtungskammer angeordneten, eine Schmelze enthaltenden Tiegel mit einem Tiegelboden, eine den Tiegel umgebende Heizeinrichtung, welche als Mehrspulenanordnung von über einander angeordneten Spulen ausgeführt ist und zur gleichzeitigen Erzeugung eines magnetischen Wanderfeldes dient, wobei die Spulen elektrisch mit mindestens einer außerhalb der Züchtungskammer angeordneten Energieversorgungseinrichtung über durch die Züchtungskammer geführte Spulenanschlüsse elektrisch verbunden sind, dadurch gekennzeichnet, dass Windungen der Mehrspulenanordnung einen Abstand von einer gedachten Tiegelmitellachse zum Innenrand der Windungen aufweisen, der mindestens bei einer Windung verschieden von den übrigen Windungen bei gleichem oder verschiedenen Windungsquerschnitten ist.

[0014] Das erfindungsgemäße Verfahren zur Herstellung von Kristallen aus elektrisch leitenden Schmelzen mittels einer Vorrichtung nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 12, wobei in einer in einem Tiegel enthaltene Schmelze durch eine aus Spulen aufgebaute Mehrspulenanordnung ein Lorentzkraftfeld mit einem im Bereich einer Tiegelwand aufweisenden Lorentzkraftdichtemaximum erzeugt wird, ist dadurch gekennzeichnet, dass das Lorentzkraftdichtemaximum vom Bereich der Tiegelwand durch Steuerung der in die Spulen eingespeisten Größen Stromstärke, Phasenverschiebung und Frequenz zu einer gedachten Tiegelmitellache hin verschoben wird.

[0015] Die erfindungsgemäße Mehrspulenanordnung nimmt eine von der üblichen geraden zylindrischen Form abweichende Form an, wobei die Form der Heizeinrichtung insbesondere eine „tulpenförmige“ Ausgestaltung annehmen kann.

[0016] Durch eine von der Zylinderform abweichenden Spulenanordnung bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung kann das erzeugte Lorentzkraftfeld örtlich in der Schmelze positioniert werden. Auf diese Weise wird die Beeinflussung der Strömung von den Randbereichen in das Innere des Tiegels ausgeweitet. Die Verteilung des magnetischen Kraftfeldes in der Schmelze wird mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung nicht nur von der Position des Tiegels innerhalb der Heizeinrichtung bestimmt.

[0017] Mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung können Bereiche der Heizeinrichtung miteinander verkoppelt und als kombinierte Heizer-Magnetfeldanordnung ausgeführt werden.

[0018] Die erfindungsgemäße Vorrichtung kann in denjenigen Kristallzüchtungsanlagen eingesetzt werden, die nach dem Czochralski-Verfahren, der vertikalen Bridgman- bzw. Gradient-Freeze-Methode, aber auch nach dem Kyropolus- und Heat-Exchanger-Verfahren arbeiten. Weiterhin ist diese Vorrichtung – neben der Züchtung von Einkristallen – auch zur Herstellung von polykristallinem Halbleitermaterial geeignet.

[0019] Bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung weicht der Abstand mindestens einer Windung von einer gedachten Tiegelmitellachse zum Innenrand der Windung gegenüber dem Abstand bzw. den Abständen der anderen Windungen der Mehrspulenanordnung ab.

[0020] Es ist erfindungsgemäß vorgesehen, dass, falls der Abstand zur gedachten Tiegelmitellachse bei allen Windungen gleich ist, bei mindestens einer Windung der Windungsquerschnitt verschieden von den übrigen Windungen ist.

[0021] Betrachtet man eine Windung in Blickrichtung der gedachten Tiegelmitellachse, so erkennt man die von der Windung umschlossene Fläche, die üblicherweise einen Kreis bildet, durch dessen Mittelpunkt die gedachte Tiegelmitellachse läuft. In einer erfindungsgemäßen Spulenanordnung kann diese Fläche die Form einer beliebigen geometrischen Fläche aufweisen, insbesondere können auch Ellipsen, Quadrate, Dreiecke, Rechtecke oder andere n-Ecke als umschlossene Fläche auftreten.

- [0022]** Eine bevorzugte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine weitere Spule unterhalb des Tiegelbodens des Tiegels angeordnet ist.
- [0023]** In einer nächsten bevorzugten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist vorgesehen, dass die Spulen Windungen aufweisen, die ineinander angeordnet sind.
- [0024]** Eine andere bevorzugte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung sieht vor, dass die Windungen mindestens einer Spule einen von den übrigen Spulen abweichenden Abstand zu der gedachten Tiegelmittelachse aufweisen.
- [0025]** Eine weitere bevorzugte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung sieht vor, dass die Windungen mindestens einer Spule einen von den übrigen Spulen abweichenden Windungsquerschnitt aufweisen.
- [0026]** In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist vorgesehen, dass der Abstand mindestens einer Windung von der gedachten Tiegelmittelachse zum Innenrand der Windung gegenüber den der anderen Windungen geringer ist.
- [0027]** Eine nächste bevorzugte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist dadurch gekennzeichnet, dass mindestens ein Windungsquerschnitt der Windungen innerhalb einer Spule gegenüber den weiteren Windungen der Spule unterschiedlich ist.
- [0028]** Erfindungsgemäß kann der Windungsquerschnitt der Windungen innerhalb einer Spule unterschiedlich sein. Der Windungsquerschnitt kann sich innerhalb einer Spule verringern oder vergrößern.
- [0029]** Eine weitere bevorzugte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung sieht vor, dass die Windungen der Spulen aus unterschiedlichen Materialien bestehen.
- [0030]** In einer anderen bevorzugten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist vorgesehen, dass die Spulen eine unterschiedliche Anzahl von Windungen aufweisen.
- [0031]** Eine nächste bevorzugte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist dadurch gekennzeichnet, dass die Spulen eine gleiche Anzahl von Windungen aufweisen.
- [0032]** Eine weitere bevorzugte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung sieht vor, dass der Windungsquerschnitt die Form einer beliebigen geometrischen Fläche aufweist.
- [0033]** In einer anderen bevorzugten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist vorgesehen, dass der Windungsquerschnitt eine rechteckige, quadratische oder runde Form aufweist.
- [0034]** In einer anderen bevorzugten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist vorgesehen, dass eine von den Windungen umschlossene Fläche die Form einer beliebigen geometrischen Fläche aufweist.
- [0035]** Dabei ist „die von einer Windung umschlossene Fläche“ jene Fläche, die man erkennt, wenn man die Windung in Blickrichtung der gedachten Tiegelmittelachse betrachtet und dann die Fläche betrachtet, die von der Windung umschlossen wird; also die Fläche, die sich ergibt, wenn man von der Projektion der Windungsinnenseite der kompletten Windung auf eine Ebene senkrecht zur gedachten Tiegelmittelachse ausgeht, und dann die von dieser Projektion in der Ebene umschlossene Fläche betrachtet.
- [0036]** Möglich ist, dass die von den Windungen umschlossene Fläche eine rechteckige, quadratische oder runde Form aufweist.
- [0037]** Durch das erfindungsgemäße Verfahren zur Herstellung von Kristallen aus elektrisch leitenden Schmelzen mittels einer Vorrichtung nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 12, wobei in einer in einem Tiegel enthaltene Schmelze durch eine aus Spulen aufgebaute Mehrspulenanordnung ein Lorentzkraftfeld mit einem im Bereich einer Tiegelwand aufweisenden Lorentzkraftdichtemaximum erzeugt wird, wird erreicht, dass das Lorentzkraftdichtemaximum vom Bereich der Tiegelwand durch Steuerung der in die Spulen eingespeisten Größen Stromstärke, Phasenverschiebung und Frequenz zu einer gedachten Tiegelmittelachse hin verschoben wird.

[0038] Die Lorentzkraftverteilung in der Schmelze durch Steuerung der in die Spulen eingespeisten Größen Stromstärke, Phasenverschiebung und Frequenz wird so modifiziert, dass sich die Verteilung besser zur Beeinflussung der Schmelzströmung eignet, indem unter anderem das Lorentzkraftdichtemaximum vom Bereich der Tiegelwand zur einer gedachten Tiegelmittelachse hin verschoben wird. Dabei kann auch eine Vorrichtung nach dem Stand der Technik mit einer üblichen zylindrisch angeordneten Heizeinrichtung, bei der die Abstände der Windungen von einer gedachten Tiegelmittelachse zur Innenwand der Windungen gleich bleibt, verwendet werden. Hier werden lediglich die Größen Stromstärke, Phasenverschiebung und Frequenz modifiziert.

[0039] In einer bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens ist vorgesehen, dass in mindestens einer Spule eine von den übrigen Spulen abweichende Phasenverschiebung eingespeist wird.

[0040] Eine weitere bevorzugte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens sieht vor, dass in den Spulen die gleichen Phasenverschiebungen eingespeist werden.

[0041] Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass mindestens für ein Paar von direkt über bzw. nebeneinander liegenden Spulen die Phasenverschiebung zwischen den an den beiden Spulen angelegte Spannung von mindestens einer der Phasenverschiebung abweicht, die sich für die verbleibenden Spulenpaare ergeben.

[0042] Als Spulenpaare kommen bei einer Heizeinrichtung bestehend aus drei übereinander angeordneten Spulen, die obere und die mittlere Spule sowie die mittlere und die untere Spule in Betracht. Besitzt die Heizeinrichtung weitere unterhalb des Tiegelbodens angeordnete Spulen, dann kommen als Spulenpaare auch weitere Kombinationen mit diesen Spulen in Betracht.

[0043] Alternativ hat bei mindestens einem Paar von direkt über bzw. nebeneinander angeordneten Spulen die Phasenverschiebung zwischen den an diesen beiden Spulen angelegte Spannung ein anderes Vorzeichen als die Phasenverschiebung von mindestens einer der verbleibenden Spulenpaare. So kann sich für mindestens ein Spulenpaar die Phasenverschiebung im Vorzeichen von den Phasenverschiebungen für die verbleibenden Spulen unterscheiden. Weiterhin ist vorgesehen, dass für alle Paare von direkt über bzw. nebeneinander liegenden Spulenpaare die gleiche Phasenverschiebung zwischen den an diesen beiden Spulen angelegte Spannung vorliegt.

[0044] Eine weitere bevorzugte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass in mindestens einer Spule eine von den übrigen Spulen abweichende Stromstärke eingespeist wird.

[0045] Eine andere bevorzugte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens sieht vor, dass in den Spulen jeweils gleich große Stromstärken eingespeist werden.

[0046] In einer nächsten bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine Spule mit einer höheren Stromstärke gegenüber den übrigen Spulen betrieben wird.

[0047] In einer nächsten bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine Spule mit einer niedrigeren Stromstärke gegenüber den übrigen Spulen betrieben wird.

[0048] Eine weitere bevorzugte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass in mindestens eine Spule eine von den übrigen Spulen abweichende Frequenz eingespeist wird.

[0049] Eine andere bevorzugte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens sieht vor, dass in die Spulen jeweils die gleiche Frequenz eingespeist wird.

[0050] In einer nächsten bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens ist vorgesehen, dass die Steuerung der Größen Phasenverschiebung, Stromstärke und Frequenz mit einer hohlzylindrischen Mehrspulenordnung erfolgt.

[0051] Im Folgenden wird ein Ausführungsbeispiel der Erfindung anhand von Zeichnungen näher erläutert.

[0052] Es zeigen

- [0053] [Fig. 1](#): einen schematischen Querschnitt durch eine Kristallzuchtungsanlage, mit drei übereinander angeordneten Spulen nach dem Stand der Technik,
- [0054] [Fig. 2](#): einen schematischen Querschnitt durch eine Kristallzuchtungsanlage mit drei übereinander angeordneten Spulen, wobei sich der Abstand der Windungen zu einer gedachten Tiegelmittelachse verringert und wobei die Windungsquerschnitte gleich bleiben,
- [0055] [Fig. 3](#): eine schematische Darstellung einer Heizeinrichtung mit drei übereinander angeordneten Spulen, wobei sich der Abstand der Windungen zu einer gedachten Tiegelmittelachse verringert und wobei die Windungsquerschnitte gleich bleiben,
- [0056] [Fig. 4](#): einen schematischen Querschnitt durch eine Kristallzuchtungsanlage mit drei übereinander angeordneten Spulen mit gleichbleibenden Abstand der Windungen zu einer gedachten Tiegelmittelachse und verbreitertem rechteckigen Windungsquerschnitt der Windungen einer Spule,
- [0057] [Fig. 5](#): eine schematische Darstellung einer Heizeinrichtung mit drei übereinander angeordneten Spulen mit gleichbleibenden Abstand der Windungen zu einer gedachten Tiegelmittelachse und verbreitertem rechteckigen Windungsquerschnitt der Windungen einer Spule,
- [0058] [Fig. 6](#): einen schematischen Querschnitt einer Kristallzuchtungsanlage mit drei übereinander angeordneten Spulen mit gleichbleibenden Abstand der Windungen zu einer gedachten Tiegelmittelachse und weiteren unterhalb des Tiegelbodens angeordneten Spulen innerhalb der übereinander angeordneten Spulen,
- [0059] [Fig. 7](#): eine schematische Darstellung einer Heizeinrichtung mit drei übereinander angeordneten Spulen mit gleichbleibenden Abstand der Windungen zu einer gedachten Tiegelmittelachse und weiteren unterhalb des Tiegelbodens angeordneten Spulen,
- [0060] [Fig. 8](#): einen schematischen Querschnitt einer Kristallzuchtungsanlage mit drei übereinander angeordneten Spulen, wobei die Windungen einer Spule einen sich verringernde Abstand zu einer gedachten Tiegelmittelachse aufweisen,
- [0061] [Fig. 9](#): eine schematische Darstellung einer Heizeinrichtung mit drei übereinander angeordneten Spulen, wobei die Windungen einer Spule, einen sich verringernde Abstand zu einer gedachten Tiegelmittelachse aufweisen,
- [0062] [Fig. 10](#): eine schematische Darstellungen einer Kristallzuchtungsanlage mit drei übereinander angeordneten Spulen nach dem Stand der Technik für Simulationsrechnungen und den Monitorpunkten g bis l,
- [0063] [Fig. 11](#): eine schematische Darstellungen einer Kristallzuchtungsanlage mit drei übereinander angeordneten Spulen und einer Spule mit geringerem Abstand der Windungen zur Tiegelmittelachse für Simulationsrechnungen und den Monitorpunkten g bis l,
- [0064] [Fig. 12](#): eine schematische Darstellungen einer Kristallzuchtungsanlage mit drei übereinander angeordneten Spulen und einer Spule mit größerem Abstand der Windungen zur Tiegelmittelachse für Simulationsrechnungen und den Monitorpunkten g bis l,
- [0065] [Fig. 13](#): eine schematische Darstellungen einer Kristallzuchtungsanlage mit drei übereinander angeordneten Spulen mit unterschiedlichen Abständen der Windungen innerhalb der Spulen zur Tiegelmittelachse für Simulationsrechnungen und den Monitorpunkten g bis l,
- [0066] [Fig. 14](#): eine schematische Darstellungen einer Kristallzuchtungsanlage mit drei übereinander angeordneten Spulen mit verbreitertem Windungsquerschnitt einer Spule für Simulationsrechnungen und den Monitorpunkten g bis l,
- [0067] [Fig. 15](#): eine schematische Darstellungen einer Kristallzuchtungsanlage mit drei übereinander angeordneten Spulen mit verbreitertem Windungsquerschnitt der oberen und unteren Spule für Simulationsrechnungen und den Monitorpunkten g bis l,
- [0068] [Fig. 16](#): eine schematische Darstellungen einer Kristallzuchtungsanlage mit drei übereinander angeordneten Spulen und mit verbreitertem Windungsquerschnitt aller Spulen für Simulationsrechnungen und den

Monitorpunkten g bis l,

[0069] [Fig. 17](#): eine schematische Darstellungen einer Kristallzuchtungsanlage mit drei übereinander angeordneten Spulen für Simulationsrechnungen mit den Monitorpunkten a bis f,

[0070] [Fig. 18](#): eine schematische Darstellungen einer Kristallzuchtungsanlage mit zwei übereinander angeordneten Spulen und einer unterhalb des Tiegels angeordneten Spule für Simulationsrechnungen und den Monitorpunkten a bis f,

[0071] [Fig. 19](#): eine schematische Darstellungen einer Kristallzuchtungsanlage mit drei Spulen mit einer mittleren teilweise unterhalb des Tiegels angeordneten Spule für Simulationsrechnungen und den Monitorpunkten a bis f,

[0072] [Fig. 20](#): eine schematische Darstellung der Aufsicht auf eine Kristallzuchtungsanlage,

[0073] [Fig. 21](#): eine schematische Darstellung der Aufsicht auf eine Kristallzuchtungsanlage wie in [Fig. 20](#), mit Markierung einer von der Windung umschlossene runden Fläche,

[0074] [Fig. 22](#): eine weitere schematische Darstellung der Aufsicht auf eine Kristallzuchtungsanlage,

[0075] [Fig. 23](#): eine schematische Darstellung der Aufsicht auf eine Kristallzuchtungsanlage wie in [Fig. 22](#), mit Markierung einer von der Windung umschlossene quadratischen Fläche.

[0076] In [Fig. 1](#) wird eine schematische Darstellung einer Kristallzuchtungsanlage im Querschnitt nach dem Stand der Technik gezeigt. In einer Zuchtungskammer 1 befindet sich eine Heizeinrichtung 4, ein Tiegel 3 mit einer Tiegelwand 3a, einem Tiegelboden 3b und einer gedachten Tiegelmittelachse 3c, der von drei übereinander angeordneten Spulen 5, 6, 7 vollständig umgeben ist. Die Heizeinrichtung 4 ist aus diesen drei axial übereinander angeordneten Spule 5, 6, 7 aus Graphit mit jeweils 3 Windungen aufgebaut. Gezeigt werden auch eine sich im Tiegel befindende Schmelze 2 und ein gezogener Kristall 9. Die Windungen 8 der Spulen 5, 6, 7 weisen jeweils einen gleichbleibenden Windungsquerschnitt 4b auf. Der Abstand 4a der Windungen 8 von einer gedachten Tiegelmittelachse 3c zum Innenrand 4c der Windungen 8 ist ebenfalls konstant, so dass die als Mehrspulenordnung aufgebaute Heizeinrichtung 4 eine gleichbleibende hohlzylindrische Form aufweist. Die Spulen 5, 6, 7 sind über die Spulenanschlüsse 10, 11, 12, 13 durch die Zuchtungskammer 1 mit einer Energieversorgungseinrichtung 14 elektrisch verbunden und können über Spulenanschlüsse 10, 11, 12, 13 an eine Wechselstromquelle als Energieversorgungseinrichtung 14 angeschlossen werden.

[0077] Bei der Anordnung nach dem Stand der Technik nach [Fig. 1](#) befindet sich das berechnete Maximum der simulierten Lorentzkraftdichte im Bereich des Tiegelrandes, d. h. im Bereich der Tiegelwand 3a. Die axiale Position ist nur beeinflussbar über die Position des Tiegels 3 in der Heizeinrichtung 4. Eine Verschiebung der Lorentzkraftdichte in Richtung einer gedachten Tiegelmittelachse 3c bzw. eine lokale Verstärkung der Magnetkraft ist hier nicht möglich.

[0078] In [Fig. 2](#) wird eine schematische Darstellung einer Kristallzuchtungsanlage im Querschnitt gezeigt, deren Heizeinrichtung 4 aus drei übereinander angeordneten Spulen 5, 6, 7 mit gleichbleibendem Windungsquerschnitt 4b aufgebaut ist. Die Windungen 8 der Spulen 5, 6, 7 weisen im Gegensatz zu denen in [Fig. 1](#) einen sich verringern den Abstand 4a bezogen auf die Innenwand 4c der Windungen 8 zu der gedachten Tiegelmittelachse 3c auf. Der Abstand 4a verringert sich auch innerhalb der Spulen 5, 6, 7. Die Windungen 8 der Heizeinrichtung 4 umschließen den Tiegel 3 im Bereich des Tiegelbodens 3b am engsten.

[0079] [Fig. 3](#) zeigt die schematische Darstellung einer Heizeinrichtung 4 aus drei übereinander angeordneten Spulen 5, 6, 7 mit gleichbleibendem Windungsquerschnitt 4b nach [Fig. 2](#).

[0080] Aus Simulationsrechnungen der Verteilung der Lorentzkraft in einer elektrisch leitenden Schmelze wird ersichtlich, dass in den in den [Fig. 2](#) und [Fig. 3](#) beschriebenen Anordnungen die maximale Lorentzkraftdichte etwas vom Tiegelrand (Tiegelwand 3a) in Richtung der gedachten Tiegelmittelachse 3c im unteren Bereich der Schmelze verschoben werden kann. Weiterhin kommt es zu einer lokalen Verstärkung der Kraft im Bereich des Tiegelbodens 3b durch die Verringerung des Abstandes 4a von der gedachten Tiegelmittelachse 4a zum Innenrand 4c der Spulenwindung 8 im Bereich der Spulen 6 und 7. Diese gezielte Verschiebung der maximalen Lorentzkraftdichte ermöglicht eine effektivere Beeinflussung der thermisch bedingten Auftragskonvektion in der Schmelze.

[0081] In [Fig. 4](#) wird eine schematische Darstellung einer Kristallzüchtungsanlage im Querschnitt mit drei übereinander angeordneten Spulen **5**, **6** und **7** gezeigt, wobei hier der Windungsquerschnitt **4b** einer Spule **6** gegenüber dem der übrigen Spulen **5**, **7** vergrößert ist. Die Windungen **8** der mittleren Spule **6** weisen einen verbreiterten rechteckigen Windungsquerschnitt **4b** auf, während der Abstand **4a** der Windungen **8** bezogen auf die gedachte Tiegelmittelachse **3c** zum Innenrand **4c** bei allen Spulen **5**, **6**, **7** gleich bleibt.

[0082] [Fig. 5](#) stellt die schematische Darstellung einer Heizeinrichtung **4** nach der [Fig. 4](#) dar, bei der die Windungen **8** die mittleren Spule **6** einen verbreiterten Windungsquerschnitt **4b** besitzen.

[0083] In [Fig. 6](#) wird eine schematische Darstellung einer Kristallzüchtungsanlage im Querschnitt mit drei übereinander angeordneten Spulen **5**, **6** und **7** und jeweils gleichbleibenden Windungsquerschnitt **4b** der Spulen **5**, **6**, **7** gezeigt, wobei hier zwei weitere Spulen **15** und **16** unterhalb des Tiegelbodens **3b** angeordnet sind. Bei den Spulen **15** und **16** sind die Windungen **8** ineinander angeordnet, und beide Spulen befinden sich in Höhe der Windung **7**.

[0084] [Fig. 7](#) zeigt die schematische Darstellung einer Heizeinrichtung **4** ähnlich zu der der in [Fig. 6](#), allerdings sind hier die Spulen **15** und **16** weiter unten angeordnet. Die jeweils unter dem Tiegelboden **3b** angeordneten Spulen **15** und **16** weisen gegenüber den Spulen **5**, **6** und **7** einen geringeren Windungsquerschnitt **4b** auf.

[0085] Mit den erfindungsgemäßen Anordnungen nach den [Fig. 6](#) und [Fig. 7](#) kann eine Verschiebung des Maximums der axialen Lorentzkraftdichteverteilung vom Tiegelrand bzw. der Tiegelwand **3a** in Richtung der gedachten Tiegelmittelachse **3c** erreicht werden. Dies ermöglicht eine effektive Beeinflussung der auftretenden thermischen Konvektion, insbesondere im Bereich unter dem Kristall **9**, welche für die Stabilisierung des Einkristallwachstums von großer Bedeutung ist. Die beschriebenen Anlagen sind besonders für Anordnungen mit hoher Schmelze **2** und mit besonders starker Auftriebskonvektion geeignet.

[0086] Die schematische Darstellung einer Kristallzüchtungsanlage nach [Fig. 8](#) zeigt eine Mehrspulenordnung mit drei übereinander angeordneten Spulen **5**, **6** und **7**, wobei hier der Abstand **4a** der Windungen **8** bezogen auf eine gedachte Tiegelmittelachse **3c** zum Innenrand der Windungen **8** nur jeweils einer Spule **7**, nämlich der der untersten, verringert. Der Windungsquerschnitt **4b** der Windungen **8** der Spulen **5**, **6**, **7** bleibt gleich.

[0087] [Fig. 9](#) stellt die schematische Darstellung einer Heizeinrichtung **4** entsprechend der [Fig. 8](#) mit einem sich verringern den Abstand **4a** der Windungen **8** bezogen auf eine gedachte Tiegelmittelachse **3c** zum Innenrand der Windungen **8** der untersten Spule **7** dar.

[0088] Mit den erfindungsgemäßen Anordnungen nach den [Fig. 8](#) und [Fig. 9](#) kann eine gezielte Verschiebung des Maximums der Lorentzkraftdichte in der elektrisch leitenden Schmelze **2** vom Tiegelrand – der Tiegelwand **3a** – erreicht werden. Durch Variation des Abstandes **4a** von der gedachten Tiegelmittelachse **3c** ist die Position der maximalen Kraftwirkung, welche die Auftriebskonvektion gezielt eindämmen kann, einstellbar.

[0089] Aus Simulationsrechnungen der Verteilung der Lorentzkraft in einer elektrisch leitenden Schmelze wird ersichtlich, dass in der erfindungsgemäßen Vorrichtungen die maximale Lorentzkraft vom Bereich der Tiegelwand **3a** – am Tiegelrand –, in Richtung der Tiegelmittelachse **3c** im unteren Bereich der Schmelze verschoben wird. Diese radiale Verschiebung der maximalen Lorentzkraftdichte ermöglicht eine effektivere Beeinflussung der Auftragskonvektion.

[0090] Zur Verschiebung des Maximums der Lorentzkraftdichte vom Bereich der Tiegelwand **3a** zur Tiegelmittelachse **3c**, also zum Tiegelinernen, werden die Größen Stromstärke $I[A]$, Phasenwinkel $\varphi[^\circ]$ und Frequenz $f[\text{Hz}]$ in den Spulen **5**, **6**, **7** der Heizeinrichtung **4**, sowie die Form der Heizeinrichtung **4** variiert.

[0091] Im Folgenden werden anhand der Vorrichtungen nach den [Fig. 10](#) bis [Fig. 19](#) Simulationsrechnungen für Steuerungsvarianten für die Einspeisung der Größen Stromstärke $I[A]$, Phasenwinkel $\varphi[^\circ]$ und Frequenz $f[\text{Hz}]$ in die Spulen **5**, **6**, **7** der erfindungsgemäßen Vorrichtungen für die Beeinflussung der Lorentzkraft in der Schmelze **2** durchgeführt. Die Monitorpunkte a bis l bezeichnen dabei die entsprechenden Messwerte für die Lorentzkraftdichte in der Schmelze **2**.

[0092] Zur Modifikation der Lorentzkraftdichte, insbesondere zur Verschiebung des Maximums vom Bereich der Tiegelwand **3a** zur Tiegelmittelachse **3c**, also zum Tiegelinernen, werden die Größen Stromstärke $I[A]$, Phasenwinkel $\varphi[^\circ]$ und Frequenz $f[\text{Hz}]$ in den Spulen **5**, **6**, **7** der Heizeinrichtung **4** variiert.

[0093] Bei den Simulationsrechnungen nach den Vorrichtungen gemäß den [Fig. 10](#) bis [Fig. 16](#) wird die in die Heizeinrichtung **4** eingespeiste Leistung so gewählt, dass sich am Tripelpunkt **17** – Punkt, bei dem die feste, flüssige und gasförmige Phase im Gleichgewicht steht – die Schmelztemperatur von GaAs, das sind 1511 K, einstellt. Es wird simuliert, welche elektromagnetischen Felder sich ergeben, wenn man mit einer Vorrichtung bestehend aus drei übereinander angeordneten Spulen **5**, **6** und **7** geeignete Wechselspannungen mit einer Frequenz von 300 Hz anlegt. Die Simulationen zeigen, dass man Stärke und Form der in der Schmelze **2** wirkenden Lorentzkkräfte verändern kann, um sie in einer für die jeweils vorliegende Züchtungskonfiguration vorteilhafte Form zu bringen.

[0094] Dabei kann es unterschiedliche Möglichkeiten geben, eine bestimmte Kraftänderung zu erhalten.

[0095] Bei einer ersten Simulation, durchgeführt mit einer Vorrichtung nach [Fig. 10](#), besteht die Vorrichtung aus einer Heizeinrichtung **4** aus drei übereinander angeordneten Spulen **5**, **6** und **7** mit jeweils vier Windungen **8**. Der Abstand **4a** der Windungen **8** bezogen auf eine gedachte Tiegelmittelachse **3c** und dem Innenrand **3c** der Windungen **8** sowie die Windungsquerschnitte **4b** sind bei dieser Anordnung gleich. An alle Spulen **5**, **6** und **7** wird eine Spannung mit der gleichen Amplitude angelegt und die Phasenverschiebung zwischen der oberen Spule **5** und der mittleren Spule **6** beträgt -70° . Ebenso beträgt die Phasenverschiebung zwischen den Spannungen, die an die mittlere Spule **6** und an die untere Spule **7** angelegt werden -70° . Um am Tripelpunkt **17** die Temperatur von 1511 K zu erhalten, muss insgesamt eine Leistung von 5,4 kW eingespeist werden, die sich fast gleichmäßig auf die zwölf Windungen **8** aufteilt, so dass in jede Windung **8** ca. 450 W Leistung eingespeist werden.

[0096] Für die Monitorpunkte g, h, i, j, k und l werden die gemessenen Lorentzkraftdichten in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1:

	Lorentzkraftdichte	Lorentzkraftdichte
Monitorpunkt	[N/m ³] horizontal	[N/m ³] vertikal
g	-26,106	-46,272
h	-68,311	-87,569
i	-30,966	-32,601
j	-85,737	-66,465
k	-34,645	-15,362
l	-91,229	-39,035

[0097] In einer zweiten Simulation – ebenfalls durchgeführt mit einer Vorrichtung nach

[0098] [Fig. 10](#) – werden die eingespeisten Phasenverschiebungen und die an den Spulen angelegten Spannungen variiert.

[0099] Die Phasenverschiebung zwischen der oberen Spule **5** und der an der mittleren Spule **6** angelegten Spannung beträgt -100° , während die Phasenverschiebung zwischen den Spannungen, die an die mittlere Spule **6** und an die untere Spule **7** angelegt werden, beträgt -40° . Die eingespeisten Leistungen entsprechen denen aus der ersten Simulation.

[0100] In einer dritten Simulation mit einer Anordnung nach [Fig. 10](#) ist die an die mittlere Spule **6** angelegte Spannung doppelt so hoch wie die an je eine der beiden anderen Spulen **5** und **7**. Dies führt dazu, dass in der mittleren Spule **6** doppelt so viel Strom fließt und eine viermal höhere Leistung vorliegt wie in der oberen Spule **5** bzw. in der unteren Spule **7**. Von den rund 5,3 kW Leistung, die zum Ansteuern der 1511 K am Tripelpunkt **17** eingespeist werden müssen, entfallen auf die vier Windungen der mittleren Spule **6** je ca. 880 W und auf die insgesamt acht Windungen der oberen **5** und der unteren Spule **7** entfallen je 220 W. Die Phasenverschiebungen zwischen den Spannungen an der oberen Spule **5** und der mittleren Spule **6** beträgt -70° , ebenso die Phasenverschiebung zwischen den Spannungen an der mittleren Spule **6** und der unteren Spule **7**.

[0101] In Tabelle 2 werden die sich ergebenden Lorentzkraftdichten an den Monitorpunkten g bis l zusammengefasst.

Tabelle 2:

Monitorpunkt	Lorentzkraftdichte [N/m ³] horizontal bei unterschiedlichen Phasendifferenzen	Lorentzkraftdichte [N/m ³] vertikal bei unterschiedlichen Phasendifferenzen	Lorentzkraftdichte [N/m ³] horizontal bei unterschiedlichen Spannungen	Lorentzkraftdichte [N/m ³] vertikal bei unterschiedlichen Spannungen
g	-18,396	-36,164	-39,271	-44,874
h	-47,463	-75,351	-104,201	-80,063
i	-24,192	-25,294	-47,500	-25,136
j	-67,389	-57,528	-135,908	-52,131
k	-29,636	-8,874	-52,712	-1,403
l	-79,405	-28,962	-143,354	-15,921

[0102] Durch die unterschiedlichen Phasendifferenzen werden die Stärke und Richtung der Lorentzkraftdichte modifiziert. Das Anlegen einer höheren Spannung an die mittlere Spule **6** sorgt dafür, dass die Kraft stärker wird und mehr in die horizontale Richtung zeigt.

[0103] In einer vierten Simulation, durchgeführt mit einer Vorrichtung nach [Fig. 11](#), werden die Abstände **4a** der Windungen **8** von einer gedachten Tiegelmittelachse **3c** zum Innenrand **4c** der Windungen **8** der Spulen **5**, **6** und **7** variiert.

[0104] Die Vorrichtung nach [Fig. 11](#) besteht aus einer Heizeinrichtung **4** aus drei übereinander angeordneten Spulen **5**, **6** und **7** mit jeweils vier Windungen **8**, wobei hier der Abstand **4a** der Windungen **8** bezogen auf eine gedachte Tiegelmittelachse **3c** zum Innenrand **4c** der Windungen **8** der mittleren Spule **6** kleiner ist als der der übrigen Spulen **5** und **7**. Da sich somit der Umfang der mittleren Spule **6** verkleinert und damit auch der elektrische Widerstand der Spule **6** verringert, wird, bei gleicher angelegter Spannung in die mittlere Spule **6** etwas mehr Leistung eingespeist als in die obere Spule **5** und untere Spule **7**. Von den rund 5,4 kW Leistung, die zum Ansteuern der 1511 K am Tripelpunkt **17** eingespeist werden müssen, entfallen auf die vier Windungen **8** der mittleren Spule **6** je rund 470 W und auf die insgesamt acht Windungen der oberen Spule **5** und der unteren Spule **7** je 440 W.

[0105] Die Phasenverschiebungen zwischen der oberen Spule **5** und der mittleren Spule **6** beträgt -70° , ebenso die Phasenverschiebung zwischen der mittleren Spule **6** und der unteren Spule **7**.

[0106] In einer fünften Simulation, durchgeführt mit einer Vorrichtung nach [Fig. 12](#), besteht diese aus einer Heizeinrichtung **4** aus drei übereinander angeordneten Spulen **5**, **6** und **7** mit jeweils vier Windungen **8**, wobei hier der Abstand **4a** der Windungen **8** bezogen auf eine gedachte Tiegelmittelachse **3c** zum Innenrand **4c** der Windungen **8** der mittleren Spule **6** größer ist als der der übrigen Spulen **5** und **7**. Da sich der Umfang der oberen Spule **5** und der unteren Spule **7** verkleinert und sich damit auch der elektrische Widerstand der Spulen **5** und **7** verringert hat, wird, bei gleicher angelegter Spannung, in jede dieser Spulen mehr Leistung eingespeist als in die mittlere Spule **6**. Von den rund 5,4 kW Leistung, die zum Ansteuern der 1511 K am Tripelpunkt **17** eingespeist werden müssen, entfallen auf die vier Windungen der mittleren Spule **6** je rund 430 W, auf die insgesamt acht Windungen **8** der oberen Spule **5** und der unteren Spule **7** entfallen je rund 465 W.

[0107] Die Phasenverschiebungen zwischen der oberen Spule **5** und der mittleren Spule **6** beträgt -70° , ebenso die Phasenverschiebung zwischen der mittleren Spule **6** und der unteren Spule **7**.

[0108] Eine sechste Simulation wurde mit einer Vorrichtung nach [Fig. 13](#) durchgeführt, bei der auch innerhalb der einzelnen Spulen der Abstand **4a** von der gedachten Tiegelmittelachse **3c** zum Innenrand **4c** der Windungen **8** wechselt, d. h. sich verringert oder vergrößert. Von den rund 5,4 kW Leistung, die zum Ansteuern der 1611 K am Tripelpunkt **17** eingespeist werden müssen, entfallen auf die vier Windungen **8** der oberen Spule **5** jetzt 442 W auf die oberste Windung, 461 W, 438 W und 475 W auf die unterste Windung **8** der Spule **5**. Auf die vier Windungen der mittleren Spule **6** entfallen 432 W auf die oberste Windung dieser Spule, weitere 461 W, 461 W und 432 W auf die unterste Windung **8** der Spule **6**. Schließlich entfallen auf die vier Windungen **8** der unteren Spule **7** 469 W auf die oberste Windung **8**, weitere 432 W, 455 W und 437 W für die unterste Windung **8** der Spule **7**.

[0109] Die Phasenverschiebungen zwischen der oberen Spule **5** und der mittleren Spule **6** beträgt -70° , ebenso die Phasenverschiebung zwischen der mittleren Spule **6** und der unteren Spule **7**.

[0110] Für die Monitorpunkte g, h, i, j, k und l werden die gemessenen Lorentzkraftdichten in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3:

Monitorpunkte	Lorentzkraftdichten [N/m ³]							
	nach Fig. 10 (Vergleich)		Abstand 4a Spule 6 kleiner		Abstand 4a Spule 6 größer		Abstände 4a innerhalb der Spulen wechseln	
	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal
g	-26,106	-46,272	-29,088	-44,894	-22,775	-46,144	-24,169	-43,773
h	-68,311	-87,569	-77,287	-84,424	-58,363	-87,452	-63,133	-81,185
i	-30,966	-32,601	-34,110	-29,524	-26,221	-33,246	-28,456	-30,609
j	-85,737	-66,456	-98,088	-63,263	-71,5511	-66,655	-79,371	-62,325
k	-34,645	-15,362	-39,372	-11,567	-29,637	-17,648	-31,735	-14,191
l	-91,229	-39,035	-104,339	-34,959	-77,397	-41,280	-81,732	-36,195

[0111] In einer weiteren siebenten Simulation, durchgeführt mit einer Vorrichtung nach [Fig. 14](#) wird der Windungsquerschnitt **4b** der Spulen in der Heizeinrichtung variiert. In einer Vorrichtung nach [Fig. 14](#) sind die Windungen **8** der mittleren Spule **6** verbreitert gegenüber den Windungen der übrigen Spulen **5** und **7**, d. h. der Windungsquerschnitt **4b** der mittleren Spule **6** ist bei dieser Anordnung größer als der der anderen Spulen. Die angelegte Spannung wird so gewählt, dass in allen drei Spule **5**, **6** und **7** in etwa die gleiche Heizleistung vorliegt. Es entfallen von den rund 5,4 kW die zum Ansteuern der 1511 K am Tripelpunkt **17** eingespeist werden müssen, auf die vier Windungen der oberen Spule **5** ca. 455 W, auf die vier Windungen der mittleren Spule **6** entfallen je ca. 444 W und auf die vier Windungen der unteren Spule **7** entfallen je ca. 447 W.

[0112] Die Phasenverschiebungen zwischen der oberen Spule **5** und der mittleren Spule **6** beträgt -70° , ebenso die Phasenverschiebung der mittleren Spule **6** und der unteren Spule **7**.

[0113] In einer achten Simulation mit einer Vorrichtung nach [Fig. 15](#) wurde der Windungsquerschnitt **4b** der Spulen in der Heizeinrichtung weiter variiert. In einer Vorrichtung nach [Fig. 15](#) sind die Windungen **8** der oberen Spule **5** und die der unteren Spule **7** verbreitert gegenüber den Windungen der mittleren Spule **6**, d. h. der Windungsquerschnitt **4b** der mittleren Spule **6** ist bei dieser Anordnung kleiner als der der anderen Spulen. Die angelegte Spannung wird so gewählt, dass in jeder dieser beiden Spulen **5** und **7** in etwa die gleiche Heizleistung vorliegt wie in der mittleren Spule **6**. Es entfallen von den rund 5,4 kW die zum Ansteuern der 1511 K am Tripelpunkt **17** eingespeist werden müssen, auf die vier Windungen der oberen Spule **5** ca. 452 W, auf die vier Windungen der mittleren Spule **6** entfallen je ca. 451 W und auf die vier Windungen der unteren Spule **7** entfallen je ca. 443 W.

[0114] In einer nächsten neunten Simulation nach [Fig. 16](#) wurde eine Vorrichtung gewählt, bei der die Windungen aller Spulen **5**, **6** und **7** einen vergrößerten Windungsquerschnitt **4b** aufweisen. Von den 5,4 kW, die zum Ansteuern der 1511 K am Tripelpunkt eingespeist werden müssen, entfallen auf die vier Windungen der oberen Spule **5** je rund 454 W, auf die Windungen **8** der mittleren Spule **6** entfallen je rund 446 W und auf die vier Windungen der unteren Spule entfallen je ca. 443 W. Die Phasenverschiebungen zwischen der oberen Spule **5** und der mittleren Spule **6** beträgt -70° , ebenso die Phasenverschiebung zwischen der mittleren Spule **6** und der unteren Spule **7**.

[0115] Die sich bei den genannten Anordnungen ([Fig. 14](#) bis [Fig. 16](#)) ergebenden Lorentzkraftdichten werden in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4:

Monitorpunkt	Lorentzkraftdichten [N/m ³]							
	nach Fig. 10		Windungsquerschnitt 4b mittlere Spule 6 breiter		Windungsquerschnitt 4b Spule 5 und 7 breiter		Windungsquerschnitt 4b Spule 5, 6 und 7 breiter	
	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal
g	-26,106	-46,272	-42,364	-62,003	-32,010	-67,647	-49,987	-88,282
h	-68,311	-87,569	-111,311	-114,922	-82,779	-128,164	-129,347	-166,684
i	-30,966	-32,601	-50,731	-39,120	-37,131	-49,779	-58,745	-62,015
j	-85,737	-66,456	-144,033	-83,172	-100,830	-101,596	-163,368	-126,328
k	-34,645	-15,362	-58,100	-12,584	-41,495	-29,427	-66,103	-29,441
l	-91,229	-39,035	-153,259	-40,083	-107,376	-67,459	-174,120	-74,762

[0116] Durch die Verbreiterung des Windungsquerschnittes **4b** der mittleren Spule **6** und die dadurch erfolgte Verringerung des Widerstandes dieser Spule kann man auch bei gleichmäßiger Aufteilung der eingespeisten Leistung wie in der Simulation, bei der die mittlere Spule **6** verbreitert wurde, auf die drei Spulen **5**, **6** und **7** in der mittleren Spule **6** einen höheren Stromfluss in der mittleren Spule **6** erhalten. Dies ändert die Form des Magnetfeldes und damit die Lorentzkräfte in der Schmelze **2**, so dass in der Simulation nach [Fig. 14](#) im Vergleich zur Simulation nach [Fig. 10](#) die horizontale Kraftkomponente deutlich größer ist. Die vertikale Kraftkomponente an den Monitorpunkten g, h und i in der Simulation nach [Fig. 14](#) ist deutlich größer als in der Simulation nach [Fig. 10](#); in den Monitorpunkten j und l nur geringfügig größer und im Monitorpunkt k fällt sie etwas ab.

[0117] Bei der Simulation nach [Fig. 15](#) mit einer Vorrichtung mit verbreitertem Windungsquerschnitt **4b** der oberen und unteren Spulen **5** und **7** und bei gleichmäßiger Aufteilung der eingespeisten Energie zeigt sich, dass die vertikale Komponente der Lorentzkraft deutlich mehr steigt als die horizontale Komponente und die Änderung der Kraft vom Ort abhängt.

[0118] Werden alle Spulen mit verbreitertem Windungsquerschnitt **4b** betrieben ([Fig. 16](#)), so erhöhen sich die Lorentzkraftdichten, die in der Schmelze wirken, gleichmäßig und die Richtungen der Kraftdichten ändern sich nicht. Wird nur der Windungsquerschnitt **4b** der mittleren Spule **6** verbreitert, erhöhen sich die Kraftdichten in der Schmelze **2**, die Richtungen der Kräfte ändern sich und die Verstärkung der Kraft ist nicht homogen. Die gezielte Verbreiterung des Windungsquerschnittes **4b** einer oder mehrerer Spulen ermöglicht es, die Kraftfelder nicht nur zu verstärken – wie bei einer gleichmäßigen Verbreiterung des Windungsquerschnittes **4b** –; sie erlaubt es auch die Richtung der Kraft zu verändern.

[0119] Eine Verstärkung der horizontalen Kraftkomponente gegenüber der vertikalen Komponente wird also erreicht, indem in die mittlere Spule **6** eine höhere Leistung eingespeist wird als in den übrigen Spulen **5** und **7**. Ein ähnlicher Effekt wird erreicht, wenn der Windungsquerschnitt **4b** der mittleren Spule verbreitert wird und weiterhin in alle Spulen in etwa die gleiche Leistung eingespeist wird.

[0120] Es werden weitere Simulationsrechnungen mit Vorrichtungen nach den [Fig. 17](#) bis [Fig. 19](#) durchgeführt.

[0121] In einer zehnten Simulationsrechnung mit einer Vorrichtung nach [Fig. 17](#) beträgt die Phasenverschiebung zwischen den Spulen **5** und **6** und zwischen den Spulen **6** und **7** jeweils 120°. In alle drei Spulen **5**, **6**, **7** wurden mit einer gleichen Stromstärke von jeweils 145 A und einer Frequenz von 50 Hz gespeist.

[0122] Es hat sich gezeigt, dass bei einer Heizeinrichtung nach [Fig. 17](#) mit drei übereinander angeordneten Spulen **5**, **6**, **7** mit gleichem Abstand **4a** von der gedachten Tiegelmittelachse **3c** zum Innenrand **4c** der Windungen **8** und gleichem Windungsquerschnitt **4b** die Lorentzkraftdichte in der Schmelze **2** in Nähe der Tiegelwand **3a** – Monitorpunkte d, e und f – wesentlich stärker ist, als am Tiegelboden **3b** – Monitorpunkte a, b und c –. Die Lorentzkraftdichte in der Schmelze **2** nimmt hier von der Tiegelwand **3a** zur gedachten Tiegelmittelachse **3c** des Tiegels **3b** um zwei Größenordnungen ab. Die berechneten Werte für die Anordnung nach [Fig. 17](#) sind in der Tabelle 5 in der ersten Reihe dargestellt.

[0123] Bei einer weiteren elften Simulation mit einer Heizenanordnung nach [Fig. 18](#) mit 2 übereinander angeordneten zylindrischen Spulen **5**, **6** und einer dritten Spule **7** mit sich verringernden Abständen **4a** der Windungen **8** zur gedachten Tiegelmittelachse **4c** kann das Maximum der Lorentzkraftdichte an den Tiegelboden **3b** in den Bereich des Monitorpunktes c verschoben werden. Bei dieser Simulation wurden alle Spulen **5**, **6** und **7** mit einer Frequenz von 50 Hz und jeweils einer Phasenverschiebung von 120° zwischen den Spulen eingespeist. Zur Verstärkung der magnetischen Kraftwirkung am Tiegelboden **3b** betrug die eingespeiste Stromstärke in der Spule **7** 145 A und den Spulen **5** und **6** davon abweichend jeweils 30 A.

[0124] Die Ergebnisse sind der Tabelle 5 in der zweiten Wertereihe dargestellt. Es hat sich gezeigt, dass die thermisch bedingte Auftriebskonvektion im Bereich unterhalb des Kristalls **9** besonders stark reduzierbar ist.

[0125] Eine weitere zwölfte Simulation zur Beeinflussung der Lorentzkraftdichte am Tiegelboden **3b** wurde mit einer Vorrichtung nach [Fig. 19](#) durchgeführt. Bei dieser Vorrichtung befindet sich eine zylindrische Spule **5** oberhalb einer Spule **6**, die dadurch gekennzeichnet ist, dass sie zwei Windungen **8** mit identischen Abstand **4a** von der gedachten Tiegelmittelachse **4c** und zwei Windungen **8** mit reduziertem Abstand **4a** aufweist. Die Spule **7** besitzt nur ineinanderliegende Windungen **8** mit unterschiedlichen Abstand **4a** von der gedachten Tiegelmittelachse **4c**. Bei dieser Anordnung wurden die drei Spulen wie folgt angesteuert: Die Frequenz beträgt 50 Hz und die eingespeiste Stromstärke 145 A in allen drei Spulen. Die Phasenverschiebung zwischen Spule **5** und **6** beträgt 10° und zwischen Spule **6** und **7** beträgt 70°.

[0126] Durch die Variation der Phasenverschiebung zwischen den Spulen **5**, **6** und **7** ist auch eine Verschiebung des Maximums und der berechneten Lorentzkraftdichte zum Monitorpunkt c erreichbar. Die Simulationsergebnisse sind in der Tabelle 5 in der dritten Messreihe zusammengestellt. Der Vorteil gegenüber einer Variation der Stromstärke besteht darin, dass die Temperaturverteilung aufgrund der eingespeisten Stromstärken nicht beeinflusst wird. Es erscheint auch eine Kombination der Variation von Stromstärke und Phasenverschiebung zwischen den Spulen als sinnvoll, um ein „maßgeschneidertes Lorentzkraftfeld“ zu erzielen und gleichzeitig eine Kristallzüchtung aus der Schmelze zu gewährleisten.

[0127] In Tabelle 5 werden die Ergebnisse für die berechneten Lorentzkraftdichten an den Monitorpunkten a–f für die Simulationsrechnungen nach Vorrichtungen gemäß der [Fig. 17](#) bis [Fig. 19](#) zusammengefasst.

Tabelle 5

Lorentzkraftdichten für Monitorpunkte in den Vorrichtung	a [N/m ³]	b [N/m ³]	c [N/m ³]	d [N/m ³]	e [N/m ³]	f [N/m ³]
Fig. 17	0,2	2	9	21	23	26
Fig. 18	4	22	33	17	1	-5
Fig. 19	6	33	54	45	22	1

[0128] In [Fig. 20](#) wird eine schematische Darstellung der Aufsicht auf eine Kristallzüchtungsanlage gezeigt. [Fig. 21](#) stellt eine schematische Darstellung der Aufsicht auf eine Kristallzüchtungsanlage wie in [Fig. 20](#) mit der Markierung einer von der Windung umschlossenen runden Fläche dar. [Fig. 22](#) zeigt eine weitere schematische Darstellung der Aufsicht auf eine Kristallzüchtungsanlage und in

[0129] [Fig. 23](#) wird eine schematische Darstellung der Aufsicht auf eine Kristallzüchtungsanlage wie in [Fig. 22](#) gezeigt, wobei hier die markierte von einer Windung umschlossenen Fläche quadratisch ist.

Bezugszeichenliste

- 1 Züchtungskammer
- 2 Schmelze
- 3 Tiegel
- 38 Tiegelwand
- 3b Tiegelboden
- 3c gedachte Tiegelmittelachse
- 4 Heizeinrichtung
- 4a Abstand

- 4b** Windungsquerschnitt
- 4c** Innenrand
- 5** Spule
- 6** Spule
- 7** Spule
- 8** Windungen
- 9** Kristall
- 10** Spulenanschluss
- 11** Spulenanschluss
- 12** Spulenanschluss
- 13** Spulenanschluss
- 14** Energieversorgungseinrichtung
- 15** Spule
- 16** Spule
- 17** Tripelpunkt
- 18** von einer Windung umschlossene Fläche
- n** Anzahl der Windungen
- a** Monitorpunkt
- b** Monitorpunkt
- c** Monitorpunkt
- d** Monitorpunkt
- e** Monitorpunkt
- f** Monitorpunkt
- g** Monitorpunkt
- h** Monitorpunkt
- i** Monitorpunkt
- j** Monitorpunkt
- k** Monitorpunkt
- l** Monitorpunkt

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- US 2002/0092461 A1 [\[0004\]](#)
- DE 10102126 A1 [\[0005\]](#)
- DE 10349339 A1 [\[0006, 0006, 0007\]](#)

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- D. T. J. Hurle, Handbook of Crystal Growth, Vol. 2a-b, Elsevier, North-Holland 1994 [\[0003\]](#)
- G. Müller in: Theoretical and Technological Aspects of Crystal Growth, Ed. R. Fornari and C. Paorici, Trans. Tech. Publ., Zuerich 1998, p. 87 [\[0004\]](#)

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Herstellung von Kristallen aus elektrisch leitenden Schmelzen, mindestens aufweisend einen in einer Züchtungskammer (1) angeordneten, eine Schmelze (2) enthaltenden Tiegel (3) mit einem Tiegelboden (3b), eine den Tiegel umgebende Heizeinrichtung (4), welche als Mehrspulenanordnung von über einander angeordneten Spulen (5), (6), (7) ausgeführt ist und zur gleichzeitigen Erzeugung eines magnetischen Wanderfeldes dient, wobei die Spulen elektrisch mit mindestens einer außerhalb der Züchtungskammer (1) angeordneten Energieversorgungseinrichtung (14) über durch die Züchtungskammer (1) geführte Spulenschlüsse (10), (11), (12), (13), (14) elektrisch verbunden sind, **dadurch gekennzeichnet**, dass Windungen (8) der Mehrspulenanordnung einen Abstand (4a) von einer gedachten Tiegelmitellachse (3c) zum Innenrand (4c) der Windungen (8) aufweisen, der mindestens bei einer Windung (8) verschieden von den übrigen Windungen (8) bei gleichem oder verschiedenen Windungsquerschnitten (4b) ist.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine weitere Spule (15), (16) unterhalb des Tiegelbodens (3b) des Tiegels (3) angeordnet ist.
3. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Spulen (15), (16) Windungen (8) aufweisen, die ineinander angeordnet sind.
4. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Windungen (8) mindestens einer Spule (5), (6), (7), (15), (16) einen von den übrigen Spulen (5), (6), (7), (15), (16) abweichenden Abstand (4a) zu der gedachten Tiegelmitellachse (3c) aufweisen.
5. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Windungen (8) mindestens einer Spule (5), (6) (7), (15), (16) einen von den übrigen Spulen (5), (7) abweichenden Windungsquerschnitt (4b) aufweisen.
6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass der Abstand (4a) mindestens einer Windung (8) von der gedachten Tiegelmitellachse (3c) zum Innenrand (4c) der Windung (8) gegenüber den der anderen Windungen (8) geringer ist.
7. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens ein Windungsquerschnitt (4b) der Windungen innerhalb einer Spule (5), (6), (7), (15), (16) gegenüber den weiteren Windungen (8) der Spule (5), (6), (7), (15), (16) unterschiedlich ist.
8. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Windungen (8) der Spulen (5), (6), (7), (15), (16) aus unterschiedlichen Materialien bestehen.
9. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Spulen (5), (6), (7), (15), (16) eine unterschiedlichen Anzahl (n) von Windungen (8) aufweisen.
10. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Spulen (5), (6), (7), (15), (16) eine gleiche Anzahl (n) von Windungen (8) aufweisen.
11. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass der Windungsquerschnitt (4b) die Form einer beliebigen geometrischen Fläche aufweist.
12. Vorrichtung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass der Windungsquerschnitt (4b) eine rechteckige, quadratische oder runde Form aufweist.
13. Vorrichtung nach einer der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass eine von der Windung (8) umschlossene Fläche (18) die Form einer beliebigen geometrischen Fläche aufweist.
14. Verfahren zur Herstellung von Kristallen aus elektrisch leitenden Schmelzen mittels einer Vorrichtung nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 12, wobei in einer in einem Tiegel (3) enthaltene Schmelze (2) durch eine aus Spulen (5), (6), (7) aufgebaute Mehrspulenanordnung ein Lorentzkraftfeld mit einem im Bereich einer Tiegelwand (3a) aufweisenden Lorentzkraftdichtemaximum erzeugt wird, dadurch gekennzeichnet, dass das Lorentzkraftdichtemaximum vom Bereich der Tiegelwand (3a) durch Steuerung der in die Spulen (5), (6), (7), (15), (16) eingespeisten Größen Stromstärke, Phasenverschiebung und Frequenz zu einer gedachten Tiegelmitellachse (3c) hin verschoben wird.

15. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass in mindestens eine Spule (5), (6), (7), (15), (16) eine von den übrigen Spulen abweichende Phasenverschiebung eingespeist wird.
16. Verfahren nach Anspruch 14 oder 15, dadurch gekennzeichnet, dass in den Spulen (5), (6), (7), (15), (16) die gleichen Phasenverschiebungen eingespeist werden.
17. Verfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 16, dadurch gekennzeichnet, dass in mindestens eine Spule (5), (6), (7), (15), (16) eine von den übrigen Spulen abweichende Stromstärke eingespeist wird.
18. Verfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 17, dadurch gekennzeichnet, dass in den Spulen (5), (6), (7), (15), (16) jeweils gleich große Stromstärken eingespeist werden.
19. Verfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 18, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine Spule (6) mit einer höheren Stromstärke gegenüber den übrigen Spulen (5), (7), (15), (16) betrieben wird.
20. Verfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 19, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine Spule (6) mit einer niedrigeren Stromstärke gegenüber den übrigen Spulen (5), (7), (15), (16) betrieben wird.
21. Verfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 20, dadurch gekennzeichnet, dass in mindestens eine Spule (5), (6), (7), (15), (16) eine von den übrigen Spulen abweichende Frequenz eingespeist wird.
22. Verfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 21, dadurch gekennzeichnet, dass in die Spulen (5), (6), (7), (15), (16) jeweils die gleiche Frequenz eingespeist wird.
23. Verfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 21, dadurch gekennzeichnet, dass die Steuerung der Größen Phasenverschiebung, Stromstärke und Frequenz mit einer hohlzylindrischen Mehrspulenordnung erfolgt.

Es folgen 20 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

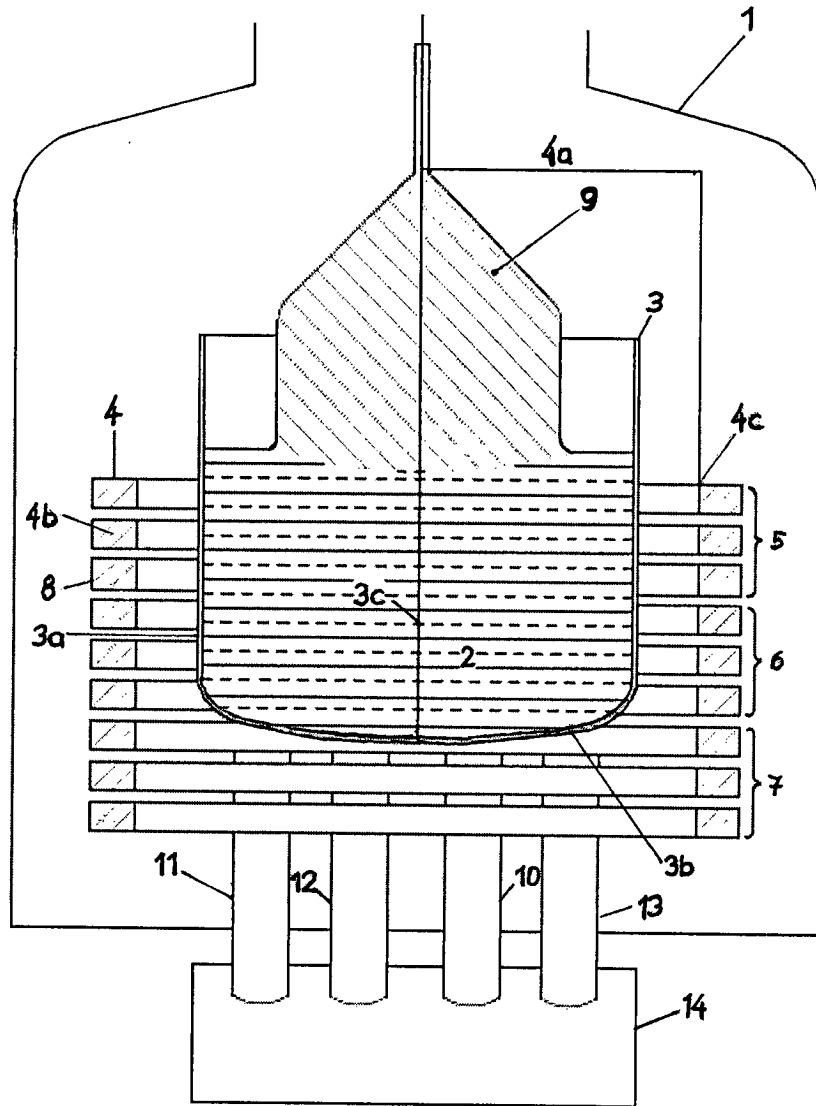


Fig. 1

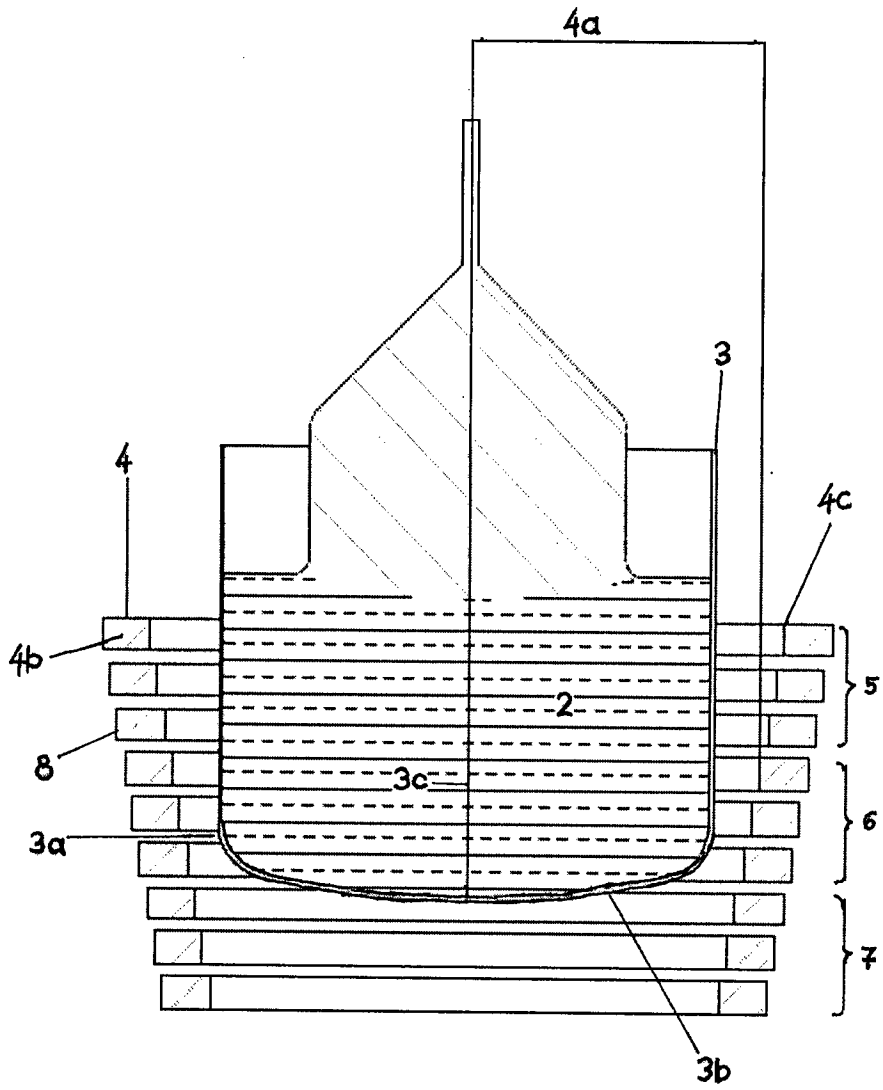


Fig. 2

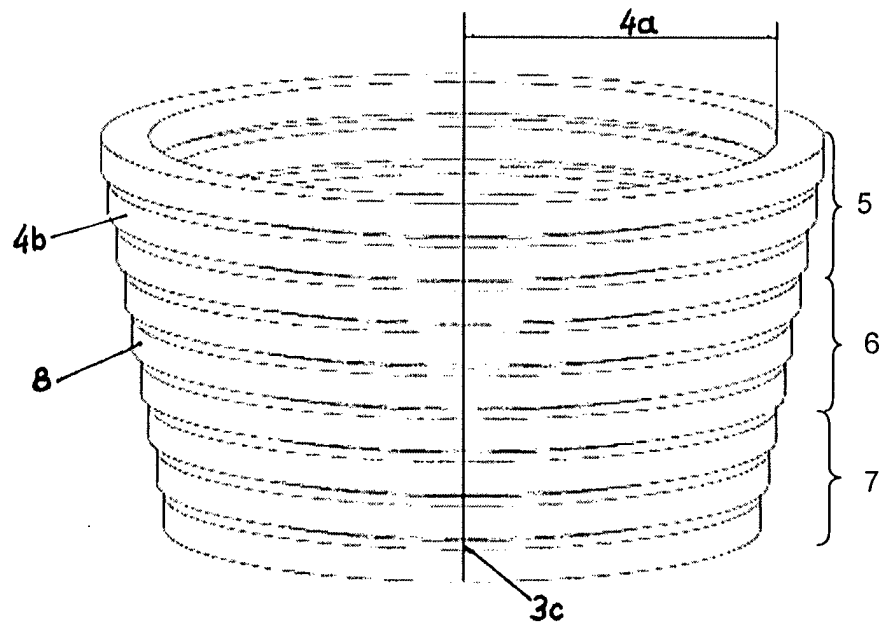


Fig. 3

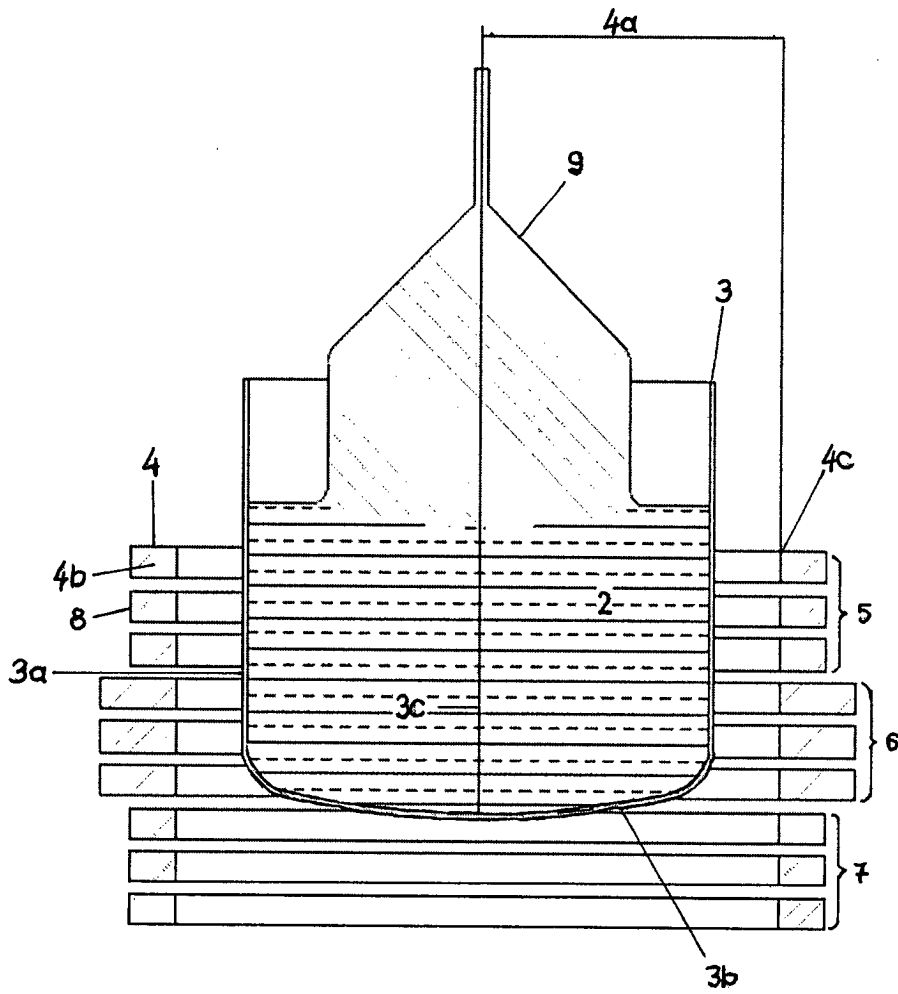


Fig. 4

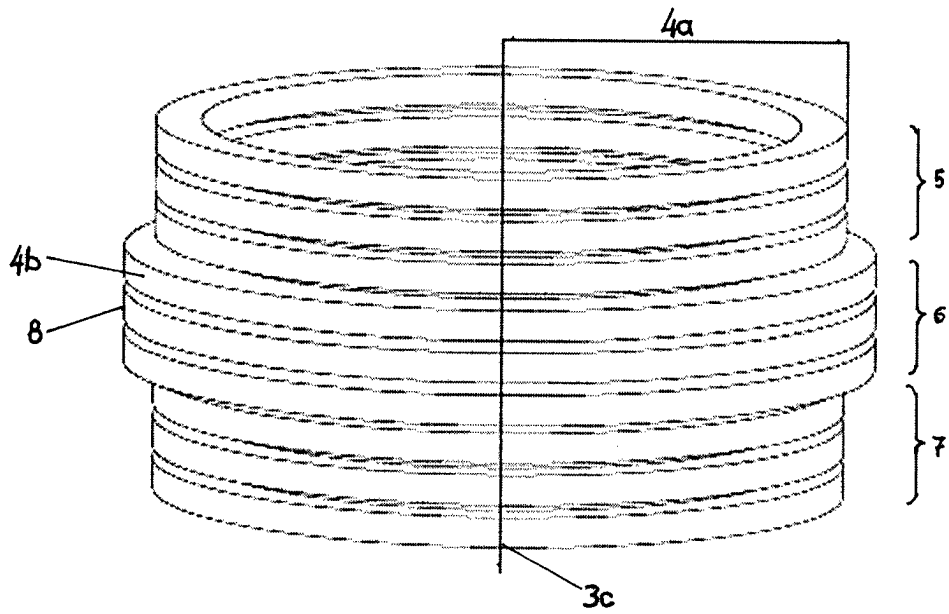


Fig. 5

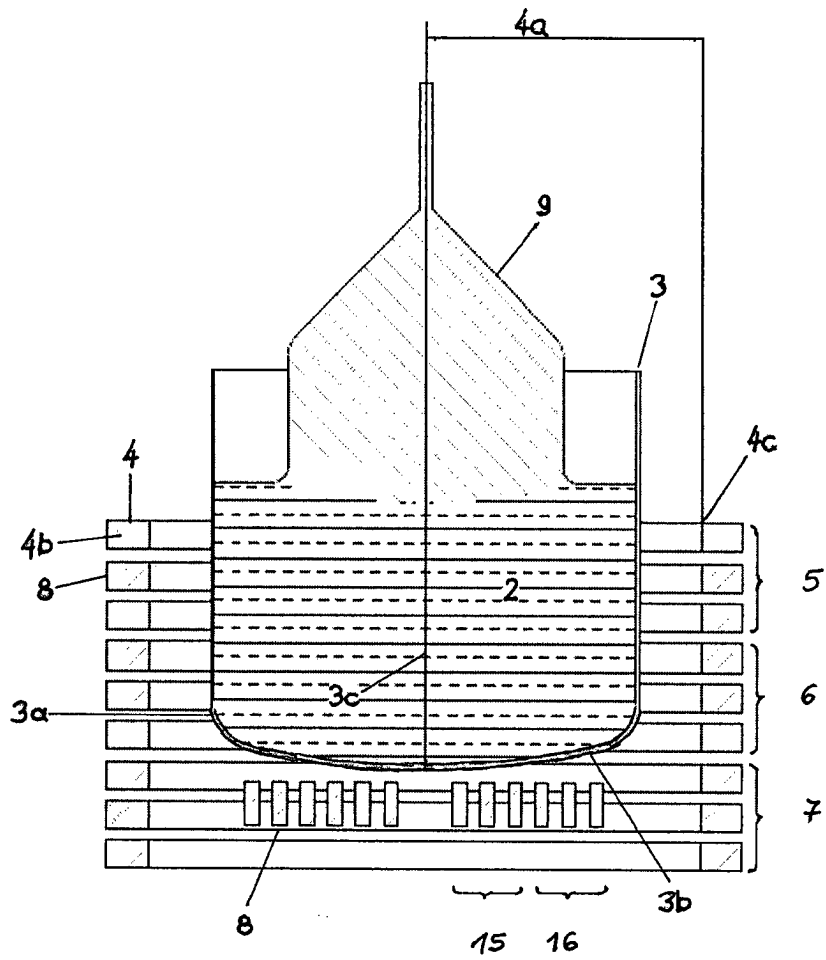


Fig. 6

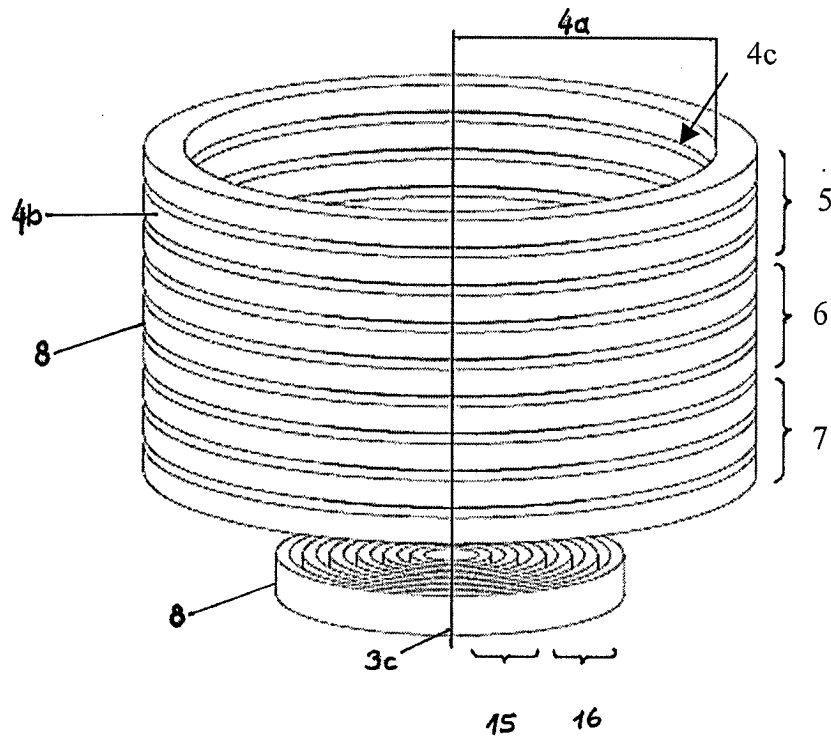


Fig. 7

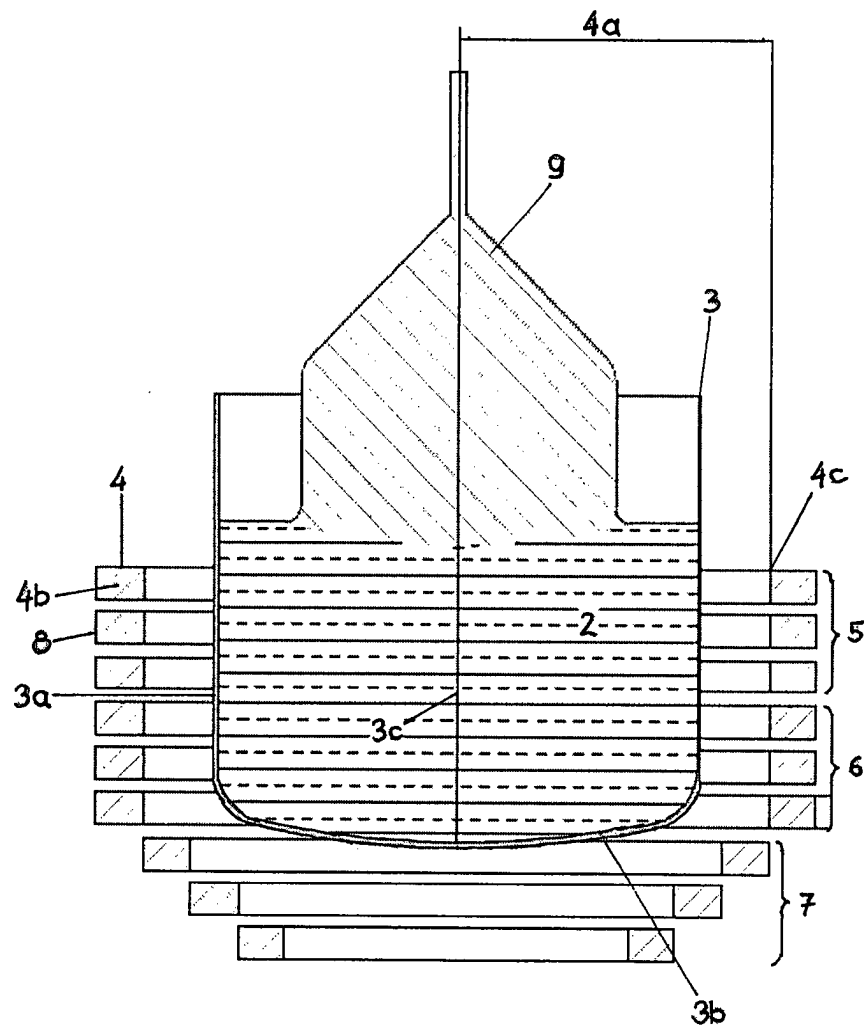


Fig. 8

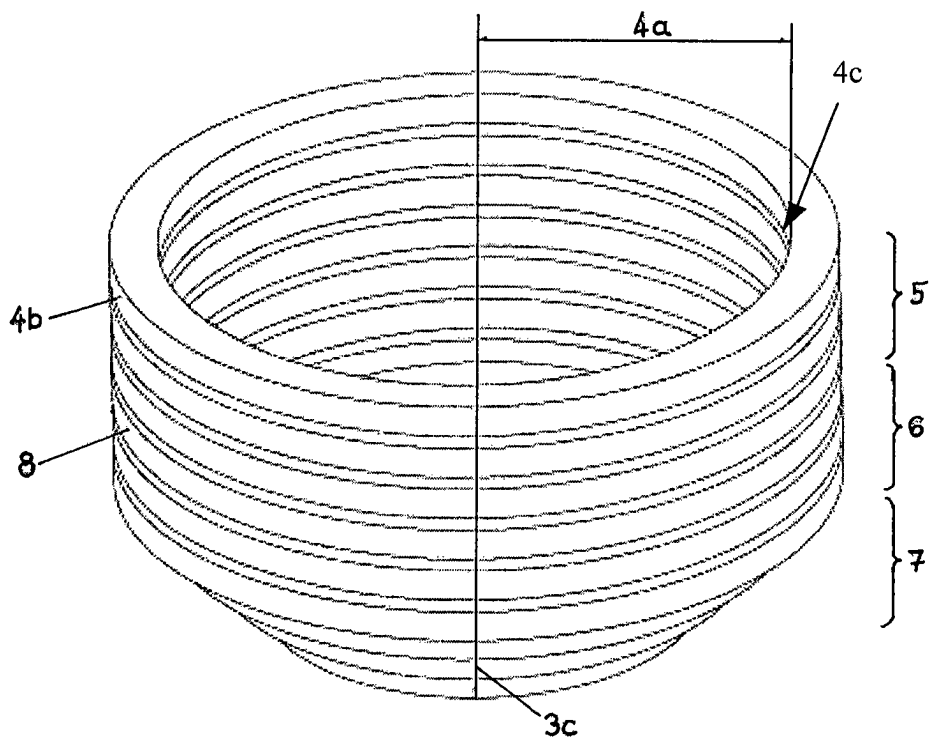


Fig. 9

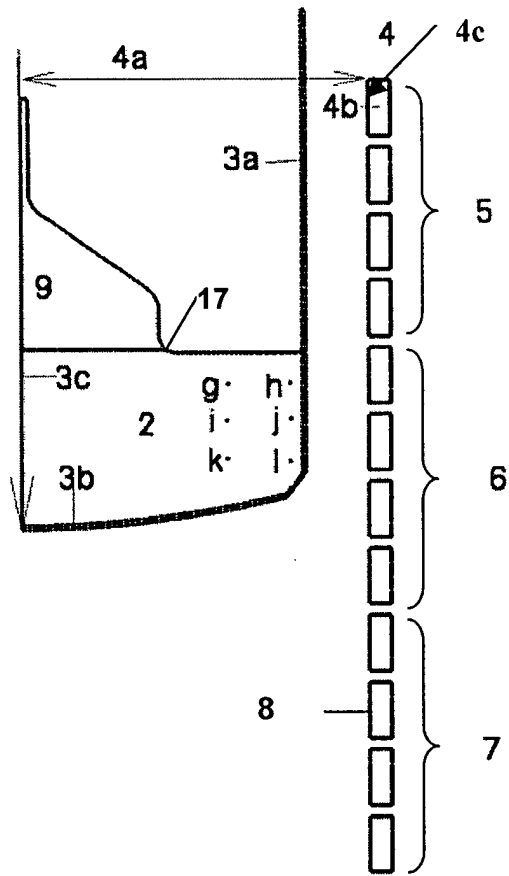


Fig. 10

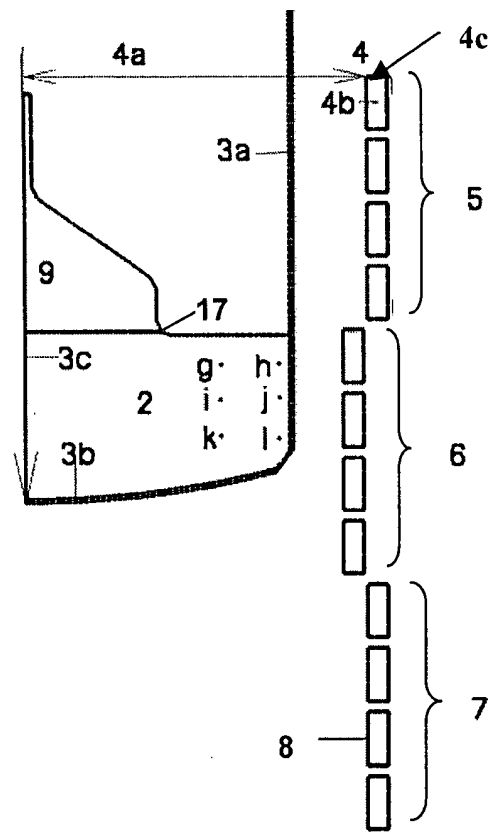


Fig. 11

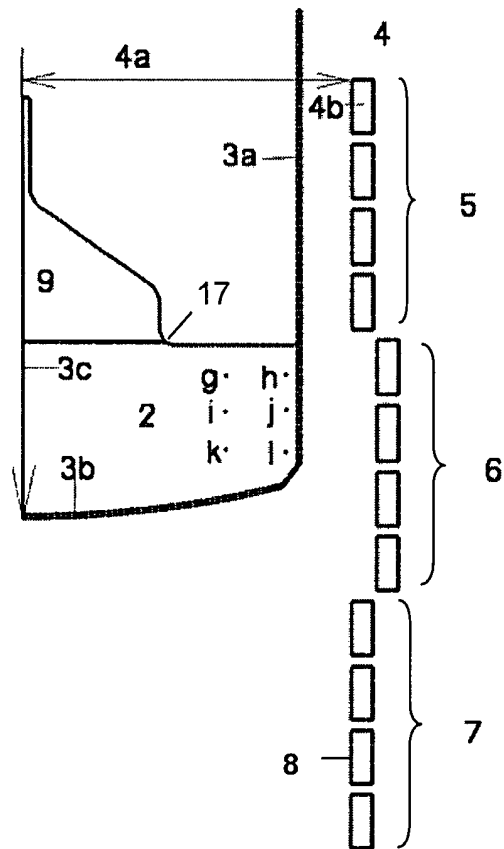


Fig. 12

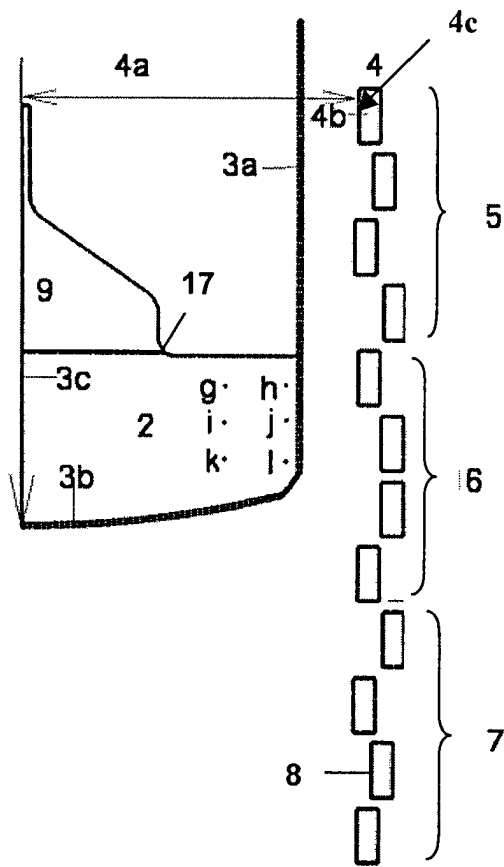


Fig. 13

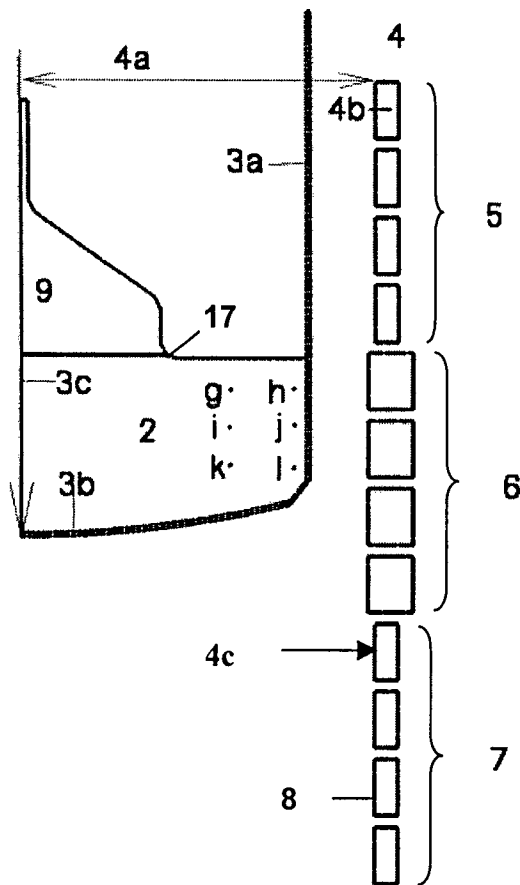


Fig. 14

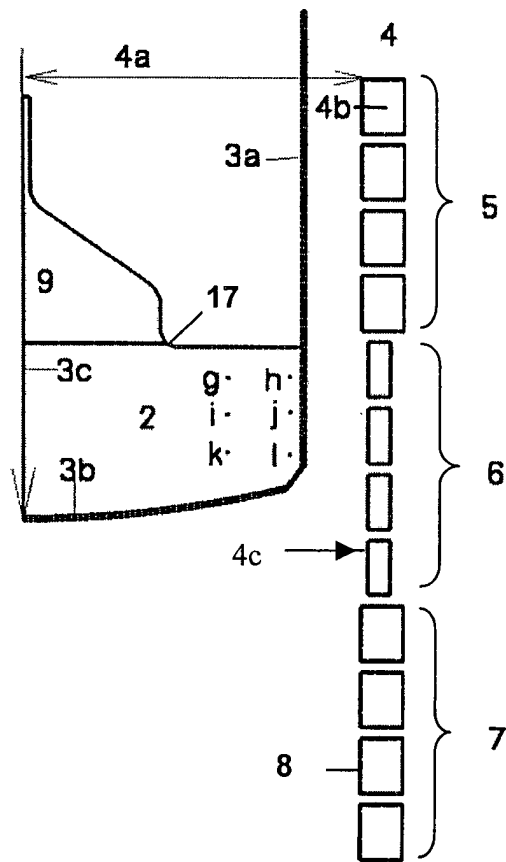


Fig. 15

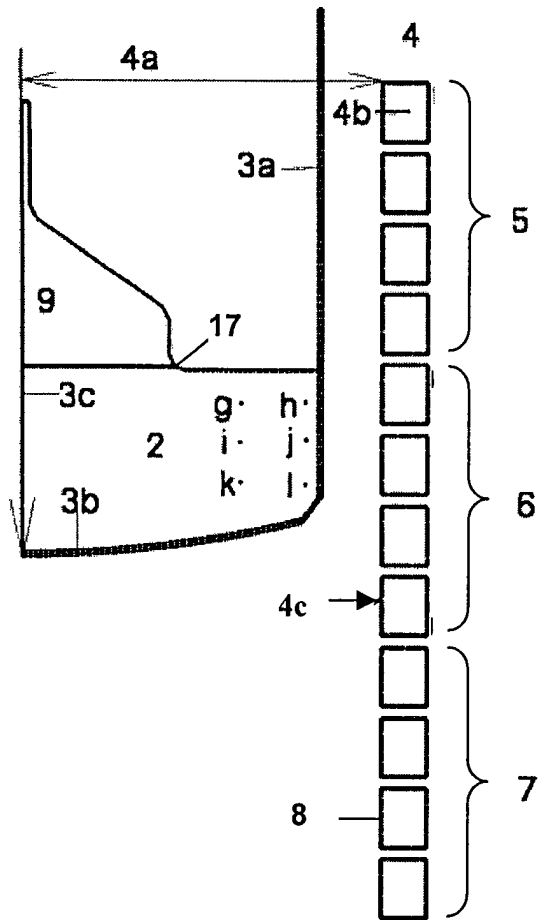


Fig. 16

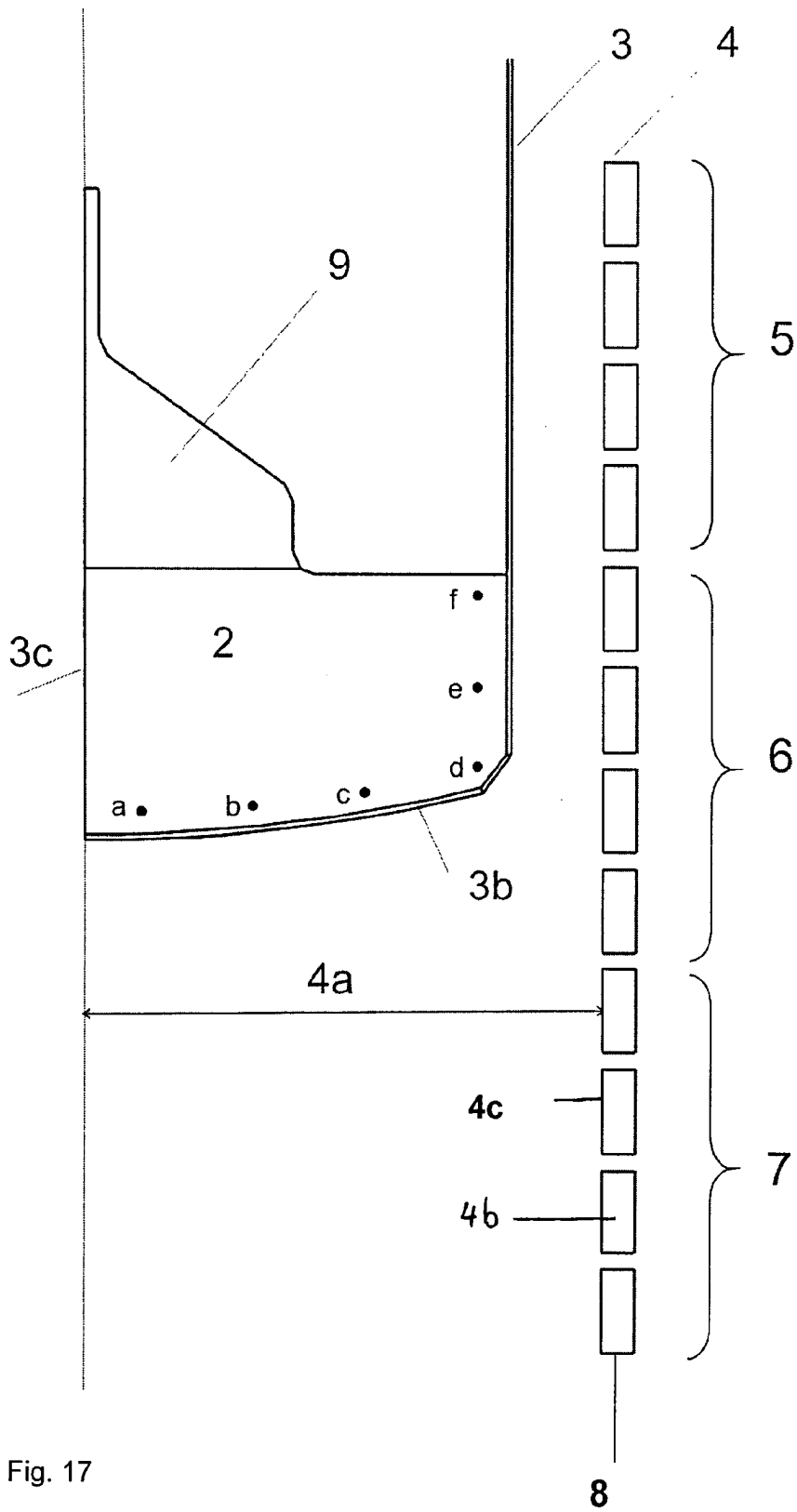


Fig. 17

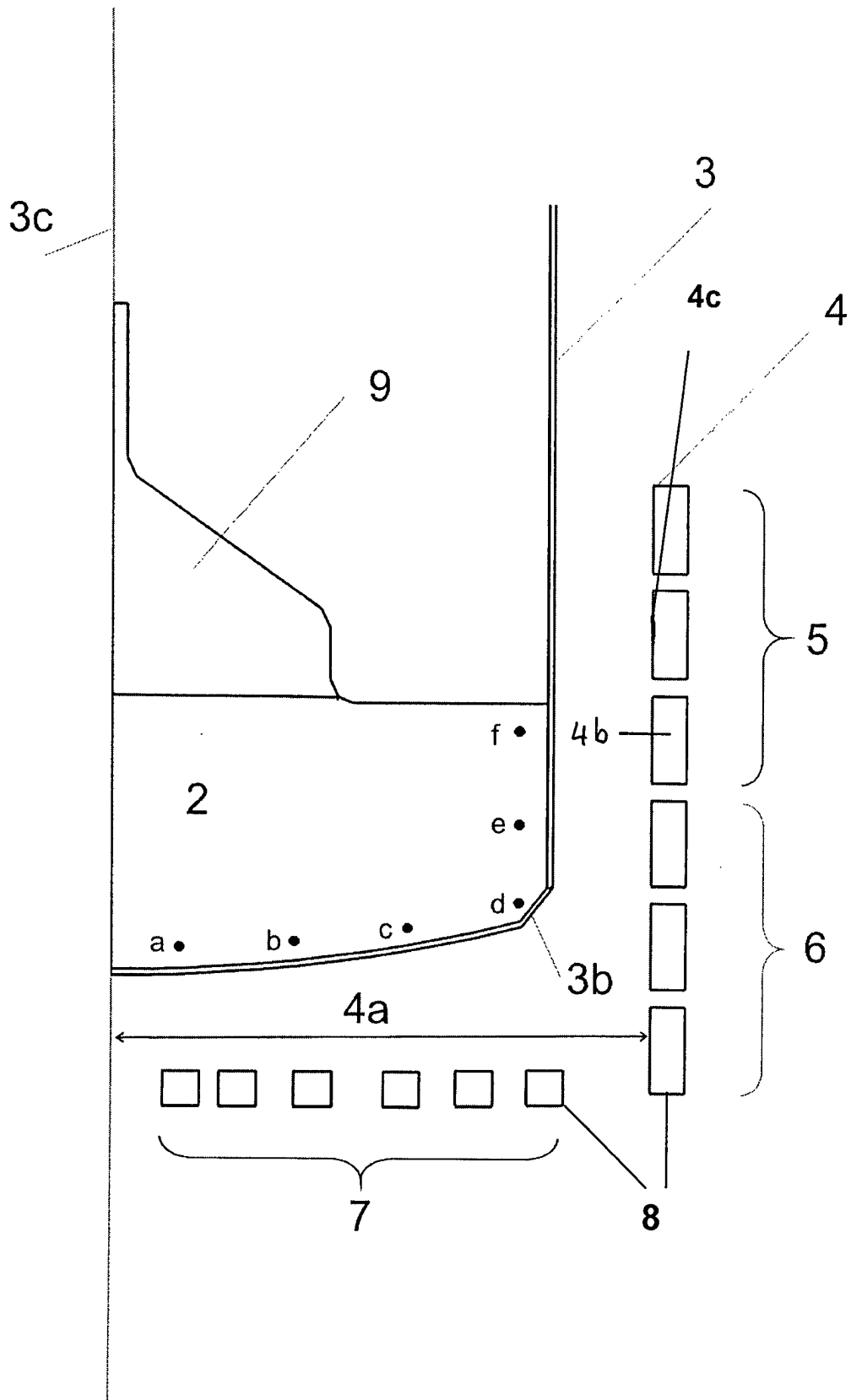


Fig. 18

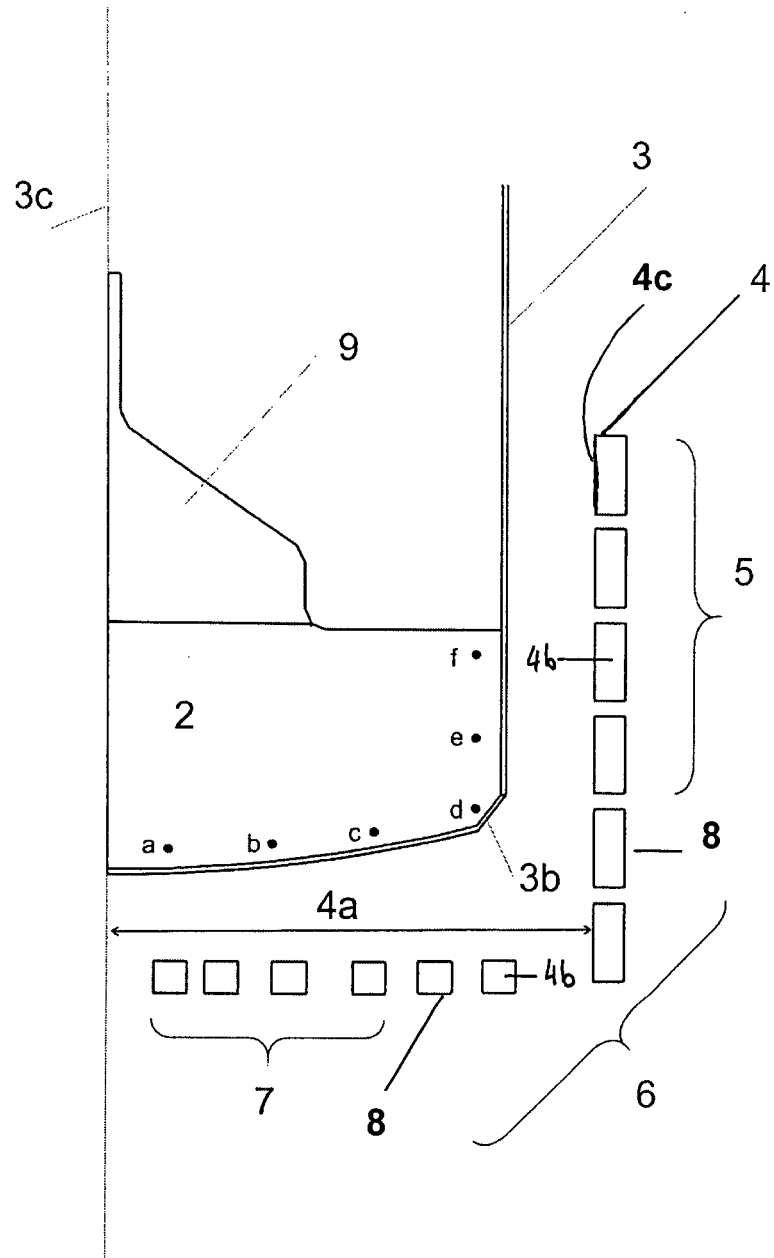


Fig. 19

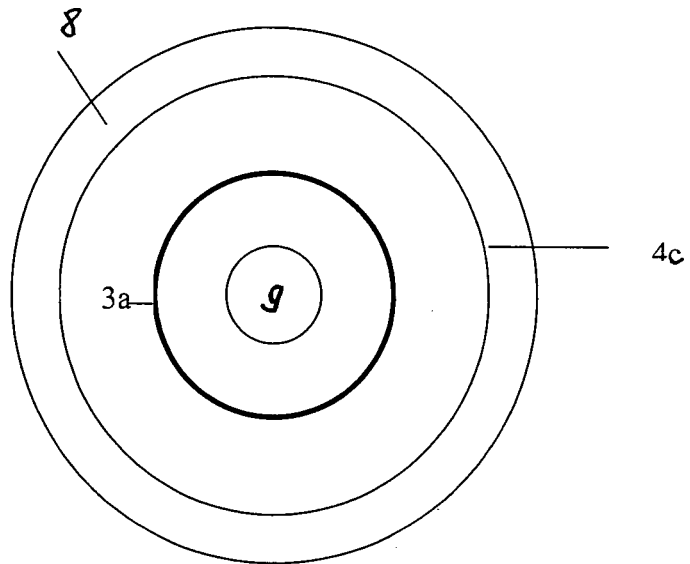


Fig. 20

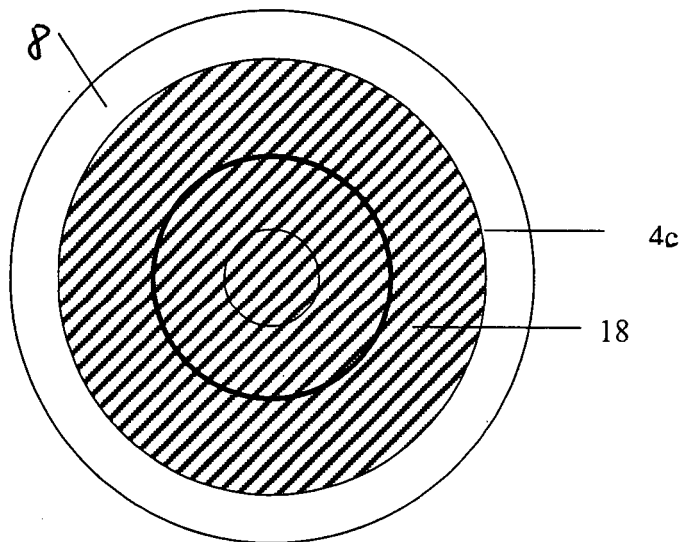


Fig. 21

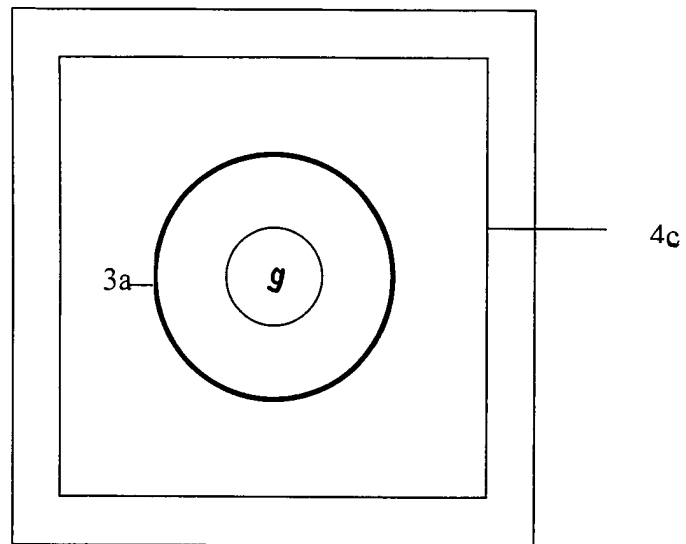


Fig. 22

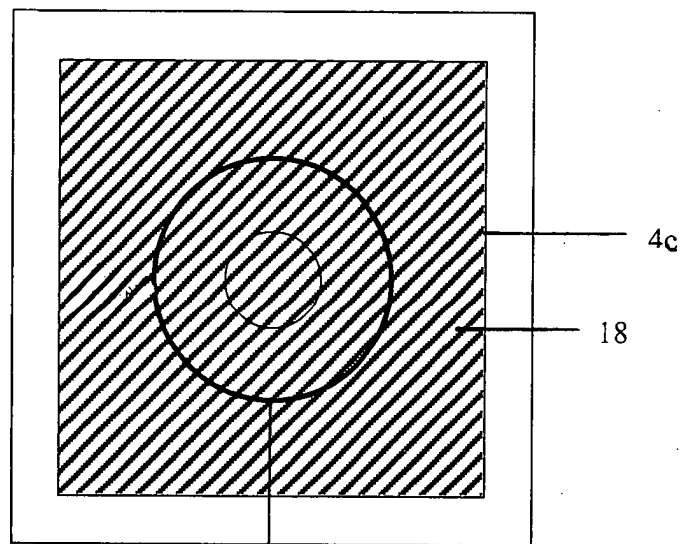


Fig. 23

3a