



(19)  
 Bundesrepublik Deutschland  
 Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2007 028 547 A1** 2008.12.24

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2007 028 547.9**

(22) Anmeldetag: **18.06.2007**

(43) Offenlegungstag: **24.12.2008**

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

**C30B 15/22 (2006.01)**

**C30B 11/00 (2006.01)**

**C30B 17/00 (2006.01)**

**C30B 15/14 (2006.01)**

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

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

(72) Erfinder:  
**Lange, Ralph-Peter, Dipl.-Ing., 10318 Berlin, DE; Jockel, Dietmar, Dipl.-Krist., 37124 Rosdorf, DE; Ziem, Mario, Dipl.-Ing., 12459 Berlin, DE; Rudolph, Peter, Prof. Dr., 12529 Schönefeld, DE; Kießling, Frank, Dr., 10439 Berlin, DE; Frank-Rotsch, Christiane, Dr., 16727 Oberkrämer, DE; Czupalla, Matthias, Dipl.-Ing., 14513 Teltow, DE; Nacke, Bernard, Prof. Dr.-Ing., 31303 Burgdorf, DE; Kasjanow, Helene, Dr.-Ing., 30539 Hannover, DE**

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

**DE10 2007 020239 A1**

**DE 103 49 339 A1**

**DE 21 07 646 A**

**JP 60-0 81 086 AA**

**JP 59-1 37 394 AA**

**"Numerical and experimental modeling of the melt flow in a traveling magnetic field for vertical gradient freeze crystal growth", V. Galindo et al., J. Cryst. Growth 303(2007) 258-261 (online verfügbar: 24.01.2007);**

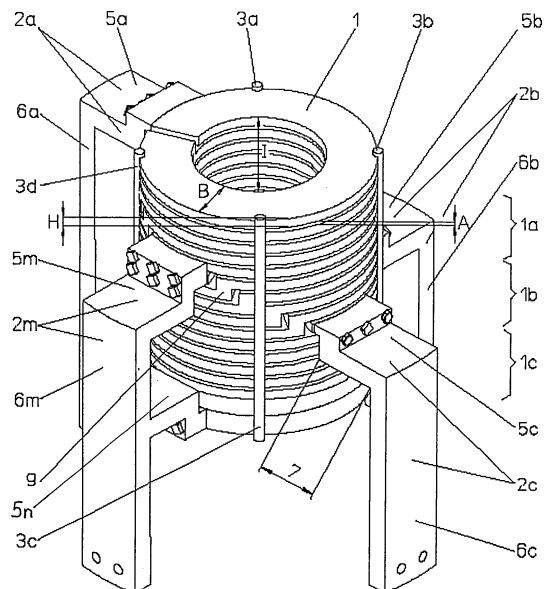
Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

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

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Züchtung von Kristallen aus elektrisch leitenden Schmelzen, mindestens aufweisend einen in einer Züchtungskammer (10) angeordneten, eine Schmelze (11) enthaltenden Tiegel (12), eine den Tiegel (12) umgebende Heizeinrichtung (1), welche als Mehrspulenanordnung von übereinander angeordneten Spulen (1a, 1b, 1c) ausgeführt ist, wobei die Spulen (1a, 1b, 1c) stufenförmige oder stufenlose Spulenwindungen (9) aufweisen und an den Spulen (1a, 1b, 1c) Stromzuführungsschienen (2a, 2b, 2c, 2m) angebracht sind, die elektrisch mit einer außerhalb der Züchtungskammer (10) angeordneten Energieversorgungseinrichtung (13) verbunden sind.

Es ist vorgesehen, dass die Heizeinrichtung (1) Stabilisierungselemente (3a, 3b, 3c, 3d) an den Spulenwindungen (9) aufweist und die Stromzuführungsschienen (2a, 2b, 2c, 2m) in Form eines Winkelteiles ausgestaltet sind.



**Beschreibung**

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

**[0002]** Es sind Vorrichtungen zur gleichzeitigen Erzeugung eines Temperaturprofils und Magnetfeldes für den Einsatz in der Kristallzüchtung bekannt. Die meisten Veröffentlichungen beschreiben Vorrichtungen zur Erzeugung eines rotierenden (transversalen) Magnetfeldes. In DE 2 107 646, Hull IBM Technical Disclosure Bulletin Vol. 23 (1980) 2756), Hoshikawa et al. (Jpn. J. Appl. Phys. 19 (1980) 133) und Kim et al., IBM Technical Disclosure Bulletin Vol. 25 (1982) 2277 sowie in DE 37 50 382 T2 wird ein den Schmelztiegel umschließender und aus drei Segmenten in Dreieckschaltung bestehender hohlzylindrischer Widerstandsheizkörper aus Graphit beschrieben, der mit einem RST-Dreiphasenstrom so durchflossen wird, dass die Anordnung neben einer bestimmten Wärmemenge ein transversal rotierendes Magnetfeld erzeugt und somit wie ein Induktionsmotor wirkt, wobei der Heizkörper als Stator und die von ihm umschlossene elektrisch leitende Schmelze als Rotor fungieren. Dadurch wird in allen drei Fällen eine in einem becherförmigen Kieselglastiegel befindliche Siliciumschmelze, je nach Richtung des Stromflusses, in rechts- oder linksdrehende Rotationsbewegung versetzt. Die Anordnung wird für die Erzeugung einer kontrollierten Konvektion und damit Durchmischung der Schmelze vorgeschlagen.

**[0003]** Es finden sich in keinen der oben aufgezählten Schriften Angaben darüber, wie der ein Magnetfeld erzeugende Widerstandsheizkörper detailliert gestaltet ist. Würde die üblicherweise in der Kristallzüchtung verwendete mäanderförmig vertikal geschlitzte Form zur Vergrößerung des Stromweges und damit des elektrischen Widerstandes verwendet werden (vgl. z. B. 3.2.-24 auf S. 703 in K. Wilke, J. Bohr, Kristallzüchtung, Vlg. H. Deutsch and Thun, Frankfurt a. M. 1988), wäre die Einkopplung des Magnetfeldes auf die an den Kontaktpunkten anliegende Phasenverschiebung beschränkt und somit uneffektiv, da sich die Feldlinien im Bereich der entgegengerichteten Strombahnen aufheben. Ein geringer longitudinaler Feldanteil würde am oberen und unteren Rand mit den waagrecht verlaufenden Abschnitten der Strombahnumkehr entstehen.

**[0004]** Um hinsichtlich der magnetischen Induktion eine effektivere Gestaltung der Strombahnen und eine Sternschaltung des Heizkörpers zu erzielen, wird in DE 2 107 646 vorgeschlagen, eine spiralenförmige dreifach parallele Schlitzung zu verwenden, die beginnend von den Kontaktpunkten am Heizkörperboden wendelförmig aufsteigt und nahe des oberen Randes endet.

**[0005]** In JP 59121183 A wird empfohlen, zwei gegenüberstehende zylindrisch gekrümmte Heizsegmente, die je aus einer Leiterbahnspirale mit Spiralart in der Segmentmitte bestehen und ein konstantes Magnetfeld zur Unerdrückung der Konvektionsflüsse in der Schmelze erzeugen. Eine solche Anordnung ist jedoch in thermischer und magnetischer Hinsicht äußerst unsymmetrisch, für eine Einkristallzüchtung nachteilig und zudem wegen der Kompliziertheit für einen industriellen Einsatz ungeeignet.

**[0006]** Für eine wirkungsvollere Dämpfung der Konvektionsströme in einem Kristallschmelztiegel ist die Einkopplung eines longitudinal wandernden Magnetfeldes besonders vorteilhaft, da es in Form eines geschlossenen Feldlinien-toroids dem formähnlichen achsensymmetrischen Strömungsmuster der Schmelze entgegenwirkt (vgl. z. B. Socoluic, Magnetohydrodynamics 39 (2003) 187) und dadurch auch eine sehr gute Kontrolle der fest-flüssig-Phasengrenzform beim vertikalen Bridgmanverfahren ermöglicht (vgl. z. B. Schwesig et al. J. Crystal Growth 266 (2004) 224). Alle oben diskutierten Lösungen erfüllen diese Anforderung nicht.

**[0007]** Es werden aber auch Heizkörperanordnungen beschrieben, die gleichzeitig Wärme und ein longitudinales magnetisches Wanderfeld erzeugen. So wird in DE 101 02 126 A1 auf eine rotationsymmetrische Heizkörperanordnung verwiesen, die simultan als spiralförmiger Mehrphaseninduktor ausgebildet ist. Auch in DE 103 49 339 A1 werden drei übereinander befindliche Heizspulenabschnitte aus spiralförmigen elektrisch leitenden Windungen aus Graphit ausgeführt und in Dreieckskonfiguration miteinander verschaltet, so dass bei Durchfluss der um 120° phasenverschobenen RST Wechselspannung in die umschlossene Schmelze toroidal wandernde Magnetfeldlinien induziert werden. Bekannt ist, dass mindestens eine Zweispulenanordnung für die kombinierte Erzeugung eines Wärme- und magnetischen Wanderfeldes vorhanden sein muss.

**[0008]** All diese aufgeführten Lösungsvorschläge besitzen die folgenden Nachteile: Einerseits sind die geometrischen Parameter der Spulenwindungen, wie der Querschnitt, Abstand und Windungszahl nicht spezifiziert und optimiert, was aber die unbedingte technische Voraussetzung für eine funktionierende gleichzeitige Betreibung der Anordnung zum Aufschmelzen bzw. Kristallisieren einer entsprechenden Substanz und Erzeugung eines magnetischen Wanderfeldes hinreichender Kraft ist und dadurch erst eine industrielle Anwendung

ermöglicht. Andererseits sind die in den Veröffentlichungen graphisch dargestellten und erläuterten Heizanordnungen mechanisch instabil, da das Eigengewicht der Windungen zum Zusammensacken und damit zu unterschiedlichen Windungsabständen bis hin zu Kurzschlüssen führen würden. Sie lassen zudem keine gezielte Variation der Windungsabstände für die jeweiligen Spulenabschnitte zu. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass die in den Stromzuführungsschienen zu den elektrischen Kontaktpunkten der Spulenabschnitte, z. B. vier bei einer Sternschaltung, jeweils auf einem bestimmten Kreiswinkel koaxial in unmittelbarer Nähe der äußeren Mantelfläche der Anordnung entlang geführt sind, wodurch es wegen deren Induktionsbeiträge zu Asymmetrien des eingekoppelten Magnetfeldes kommt, was wiederum einer bei Kristallzüchtungsprozessen geforderten Rotationssymmetrie der Wärme- und Massfelder in der Schmelze widerspricht. Außerdem wird keine technische Lösungen hinsichtlich der Kontaktzuführungen für eine Sternschaltung aufgezeigt.

**[0009]** Aufgabe der Erfindung ist es, eine Vorrichtung zur Herstellung von Kristallen, Einkristallen wie Polykristallen, aus elektrisch leitenden Schmelzen bereitzustellen, mit der der Züchtungsprozess und damit die Qualität der herzustellenden Kristalle verbessert wird, insbesondere durch Verbesserung der mechanischen Stabilität der Heizeinrichtung und in Verbindung mit der Vermeidung eines unsymmetrischen magnetisches Zusatzfeldes mit störender Wirkung in der Schmelze.

**[0010]** Die Aufgabe wird gelöst durch eine Vorrichtung mit den Merkmalen des Anspruches 1.

**[0011]** Vorteilhafte Ausgestaltungen der erfindungsgemäßen Vorrichtung sind in den Unteransprüchen enthalten.

**[0012]** So ist die erfindungsgemäße Vorrichtung zur Herstellung von Kristallen aus elektrisch leitenden Schmelzen, mindestens aufweisend einen in einer Züchtungskammer angeordneten, eine Schmelze enthaltenden Tiegel, eine den Tiegel umgebende Heizeinrichtung, welche als Mehrspulenordnung von übereinander angeordneten Spulen ausgeführt ist, wobei die Spulen stufenförmige oder stufenlose Spulenwindungen aufweisen und an den Spulen Stromzuführungsschienen angebracht sind, die elektrisch mit einer außerhalb der Züchtungskammer angeordneten Energieversorgungseinrichtung verbunden sind, dadurch gekennzeichnet, dass die Heizeinrichtung Stabilisierungselemente an den Spulenwindungen aufweist und die Stromzuführungsschienen in Form eines Winkelteiles ausgestaltet sind.

**[0013]** In einer bevorzugten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist vorgesehen, dass die Stabilisierungselemente als zylindrische Stäbe mit nutförmigen Einkerbungen ausgestaltet sind.

**[0014]** In einer anderen bevorzugten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist vorgesehen, dass die Stabilisierungselemente als zylindrische Stäbe mit Plättchen ausgestaltet sind.

**[0015]** In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist vorgesehen, dass die Stabilisierungselemente koaxial entlang der Spulenaußenseite zwischen den Stromzuführungsschienen angeordnet sind, wobei die nutförmigen Einkerbungen in die Spulenwindungen der Spulen greifen oder die Plättchen zwischen den Spulenwindungen liegen.

**[0016]** Eine nächste bevorzugte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung sieht vor, dass mindestens zwei Stabilisierungselemente vorhanden sind.

**[0017]** Durch das Anbringen der Stabilisierungselemente wird ein wesentlicher Nachteil aller bisher bestehenden Anordnungen, nämlich das Zusammensacken der mechanisch instabilen Heizerwindungen, vermieden und ein weiterer Parameter zur Beeinflussung des thermischen und des magnetischen Feldes, nämlich variierende oder gleichbleibende Abstände zwischen den einzelnen Windungen, gegeben.

**[0018]** Eine weitere bevorzugte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine nutförmige Einkerbung an den Stabilisierungselementen vorhanden ist.

**[0019]** In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist vorgesehen, dass die Stabilisierungselemente mindestens ein Plättchen aufweisen.

**[0020]** Eine nächste bevorzugte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist dadurch gekennzeichnet, dass die Stromzuführungsschienen mindestens eine horizontale Schiene und eine vertikale Schiene aufweisen, wobei diese zueinander in Form eines Winkelteiles miteinander verbunden sind.

**[0021]** Eine andere bevorzugte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung sieht vor, dass die Schienenlänge der horizontalen Schienen mindestens der Länge der Eindringtiefe des magnetischen Flusses bei einer jeweiligen verwendeten Frequenz entspricht.

**[0022]** Mit dieser Anordnung wird eine Induktion von Strömen, die aus dem Stromfluss der vertikalen Stromzuführungen in der Schmelze, welche zu Asymmetrien des mit dem Spulenheizer erzeugten Flusses führen würde, verhindert.

**[0023]** In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist vorgesehen, dass die horizontale Schiene der Stromzuführungsschienen mit mindestens einer Spule elektrisch leitend verbunden ist. Die horizontale Schiene der Stromzuführungsschienen ist mit zwei Spulen elektrisch leitend verbunden, wenn sie als Sternpunkt im Falle einer Sternschaltung fungiert.

**[0024]** Eine andere bevorzugte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung sieht vor, dass die vertikalen Schienen der Stromzuführungsschienen außerhalb der Züchtungskammer mit der Energieversorgungseinrichtung elektrisch leitend verbunden sind.

**[0025]** Die vertikale Schiene der Stromzuführungsschienen kontaktiert zunächst eine vakuum- und druckdichte Kesseldurchführung elektrisch leitend und ist danach außerhalb der Züchtungskammer mit der Energieversorgungseinrichtung elektrisch leitend verbunden.

**[0026]** Eine nächste bevorzugte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist dadurch gekennzeichnet, dass eine Stromzuführungsschiene zwei horizontale Schienen aufweist, die mit den Spulen elektrisch verbunden sind.

**[0027]** Damit wird erreicht, dass eine Stromzuführung den Sternpunkt von zwei einander angrenzenden Spulen darstellt, wodurch eine Zuführung eingespart wird. Eine Spule wird elektrisch so verschaltet, dass eine identische Feldrichtung zu den anderen Spulen erhalten wird.

**[0028]** In einer anderen bevorzugten Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist vorgesehen, dass die Spulenwindungen (9) einen Windungsquerschnitt (Q) mit einer Windungsbreite (B) und einer Windungshöhe (H) im Verhältnis von 10:1 bis 1:10 aufweisen.

**[0029]** Eine weitere bevorzugte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist dadurch gekennzeichnet, dass die Spulenwindungen einen Windungsquerschnitt mit der Windungsbreite und der Windungshöhe im Verhältnis von 5:1 aufweisen. Die Geometrie der Spulenwindungen wird erfindungsgemäß auf ihre Stabilität und auf ihren spezifischen Widerstand abgestimmt.

**[0030]** Eine nächste bevorzugte Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Vorrichtung sieht vor, dass der Windungsquerschnitt (Q) eine beliebige geometrische Form aufweist.

**[0031]** Mit der erfindungsgemäßen Lösung werden die aufgezeigten Nachteile des Standes der Technik vermieden: Die Stabilisierungselemente sorgen dafür, dass über die gesamte Länge der Heizeinrichtung bzw. einer Spulenlänge der Windungsabstand mechanisch stabil und konstant oder stabil und aufweitend bzw. verjüngend zur Einstellung eines Temperaturgradienten gehalten wird.

**[0032]** Die spiral- oder stufenförmig aufsteigenden Strombahnen, die die Spulen der hohlzylindrischen Heizeinrichtung aus Reinstgraphit bilden, weisen einen solchen Windungsquerschnitt und solche Windungsabstände auf, dass bei Stromdurchfluss bestimmter Stärke einerseits die Schmelztemperatur der jeweiligen Züchtungssubstanz erreicht bzw. bis zu ca. 100°C überschritten und andererseits mit gleicher Stromstärke aber optimierter Phasenverschiebung (Phasenwinkel) und Frequenz des Drehstromes ein magnetisches Wanderfeld mit einer solchen Induktionsstärke und Feldlinienkraft erzeugt wird, die der Flusskraft der Konvektionsströme in der Schmelze entgegengerichtet ist, diese aufhebt bzw. umkehrt oder der Flusskraft der Konvektionsströme in der Schmelze gleichgerichtet ist und diese verstärkt.

**[0033]** 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.

**[0034]** Es hat sich gezeigt, dass eine Optimierung im Vorfeld der Anfertigung der erfindungsgemäßen Vorrichtung mit Hilfe einer numerischen Modellierung erfolgen kann, über die zunächst die Konfiguration und Flusskraft der Konvektion berechnet und anschließend unter Vorgabe der für die Züchtung gesetzten Heizleistung, d. h. des Heizstromes, und der Heizspannung, die Geometrie und der Abstand der Windungen sowie Frequenz und Phasenverschiebung des Drehstromes so ermittelt wird, dass die o. g. Wirkung bestmöglich erzielt wird.

**[0035]** Die thermische und magnetische Rotationssymmetrie der Vorrichtung wird erfindungsgemäß dadurch gewährleistet, dass die Stromzuführungsschienen an den Kontaktpunkten der Spulen erfindungsgemäß nicht achsenparallel entlang der Manteloberfläche der Spulen verlaufen, sondern dass sie als in Form eines Winkelteiles „kranförmig“ gestaltet sind und somit den Strom über waagerechte Ausleger, den horizontalen Schienen der Stromzuführungsschienen, zuführen. Die Stromzuführungsschienen sind erst nach einer unkritischen Distanz, diese beträgt mindestens die Eindringtiefe des magnetischen Flusses bei der verwendeten Frequenz, abgewinkelt und mit den Durchführungen der Züchtungskammer verbunden.

**[0036]** Im folgenden wird ein Ausführungsbeispiel der Erfindung anhand von Zeichnungen näher erläutert.

**[0037]** Es zeigen

**[0038]** [Fig. 1](#): einen schematischen Querschnitt durch eine Kristallzüchtungsanlage,

**[0039]** [Fig. 2](#) eine schematische Darstellung der Heizeinrichtung der Kristallzüchtungsanlage,

**[0040]** [Fig. 3I](#) eine schematische Darstellung von Stabilisierungselementen mit nuttförmigen Einkerbungen,

**[0041]** [Fig. 3II](#) eine schematische Darstellung der Stabilisierungselemente mit nuttförmigen Einkerbungen und den anliegenden Spulenwindungen,

**[0042]** [Fig. 3III](#) eine schematische Darstellung der Stabilisierungselemente mit Plättchen.

**[0043]** [Fig. 4](#) eine grafische Darstellung der Verteilung der vertikalen magnetischen Kraftkomponente in Abhängigkeit von der Geometrie der Stromzuführungsschienen.

**[0044]** In [Fig. 1](#) wird die schematische Darstellung einer Kristallzüchtungsanlage im Querschnitt gezeigt.

**[0045]** In einer Züchtungskammer **10** befindet sich ein Tiegel **12**, der eine Schmelze **11** enthält. Der Tiegel **12** wird von einer Heizeinrichtung **1** umgeben. Gezeigt wird auch ein aus der Schmelze **11** erstarrter Kristall **8**.

**[0046]** Die Heizeinrichtung **1** ist aus drei übereinander angeordneten Spule **1a**, **1b**, **1c** aufgebaut. Die Spulenwindungen **9** der Spulen **1a**, **1b**, **1c** weisen einen Windungsquerschnitt **Q** auf. Die Spulen **1a**, **1b**, **1c** haben jeweils eine Spulenlänge  $L_a$ ,  $L_b$ ,  $L_c$ . An den Spulen **1a**, **1b**, **1c** befinden sich elektrisch leitende Stromzuführungsschienen **2a**, **2b**, **2c** und **2m**, die durch die Züchtungskammer **10** geführt und mit einer Energieversorgungseinrichtung **13** elektrisch verbunden sind. [Fig. 1](#) zeigt auch die zwischen den Stromzuführungsschienen **2a**, **2b**, **2d**, **2m** angeordneten Stabilisierungselemente **3a**, **3b**, **3c**, **3d**.

**[0047]** [Fig. 2](#) zeigt eine schematische Darstellung der Heizeinrichtung für eine Kristallzüchtungsanlage.

**[0048]** Die Heizeinrichtung **1** besteht aus einer Mehrspulenordnung mit drei übereinander angeordneten Spulen **1a**, **1b**, **1c** aus Graphit, die stufenförmige Spulenwindungen **9** aufweisen. An den Spulen **1a**, **1b**, **1c** der Heizeinrichtung **1** sind vier Stabilisierungselemente **3a**, **3b**, **3c**, **3d**, die als Distanzhaltestäbe fungieren, im Winkel von  $90^\circ$  jeweils zwischen den Stromzuführungsschienen **2a**, **2b**, **2c**, **2m** angeordnet. Die Spulenwindungen **9** der Spulen **1a**, **1b**, **1c** weisen eine Windungsbreite **B**, eine Windungshöhe **H** und einen Windungsabstand **A** auf. Die Spulen **1a**, **1b**, **1c** sind über die Stromzuführungsschienen **2a**, **2b**, **2c**, **2m** so miteinander verschaltet, dass sie strommäßig eine Sternkonfiguration ergeben.

**[0049]** Die Stromzuführungsschienen **2a**, **2b**, **2c** und **2m** sind in Form eines Winkelteiles, d. h. „kranförmig“ ausgebildet. Sie weisen jeweils mindestens eine horizontale Schiene **5a**, **5b**, **5c**, **5m** und eine vertikale Schiene **6a**, **6b**, **6c**, **6m** auf, die nahtlos miteinander im rechten Winkel verbunden sind. Die horizontale Schiene **5a**, **5b**, **5c**, **5m** ist mit den Kontakten der Spulen **1a**, **1b**, **1c** elektrisch verbunden. Die Schienenlänge **7** der horizontalen Schienen **5a**, **5b**, **5c**, **5m** entspricht mindestens der Eindringtiefe des magnetischen Flusses bei der verwendeten Frequenz des Dreiphasenwechselstromes, d. h. die als Winkelteil ausgestaltete Stromzuführungsschie-

nen **2a**, **2b**, **2c**, **2m** werden erst nach einer kritischen Distanz zu den Spulen **1a**, **1b**, **1c** der Heizeinrichtung **1** von mindestens der Eindringtiefe des magnetischen Flusses bei der verwendeten Frequenz abgewinkelt. Die Stromzuführungsschienen **2a**, **2b** und **2c** kontaktieren so die Spulenendpunkte. Die mit zwei horizontalen Schienen **5m**, **5n** versehene Stromzuführungsschiene **2m** bildet den gemeinsamen Mittelpunktkontakt der Sternschaltung.

**[0050]** Die Spulen **1a**, **1b**, **1c** sind an eine Wechselspannungsquelle als Energieversorgungseinrichtung **13** angeschlossen. Möglich ist eine Dreieckschaltung oder eine Sternschaltung. Bei einer Dreiecksschaltung entfällt die horizontale Schiene **5m**.

**[0051]** Eine Sternschaltung hat den Vorteil einer freien Wahl der Phasenverschiebung. Dazu muss der gemeinsame Mittelpunkt herausgeführt werden.

**[0052]** Die vier Stabilisierungselemente **3a**, **3b**, **3c**, **3d** aus Hochtemperaturkeramik unterstützen die mechanische Stabilität der Heizeinrichtung **1** und sorgen für äquidistante oder variable Windungsabstände  $A$ . Auf diese Weise wird der Windungsabstand  $A$  der Spulenwindungen **9** der Spulen **1a**, **1b**, **1c** flexibel beeinflussbar gehalten.

**[0053]** Ein Innendurchmesser **1** der Heizeinrichtung **1** beträgt 130 mm und ermöglicht die Umschließung des Tiegels **12** kleinerer Außenabmessung. Bei Durchfluss eines Dreiphasenstromes bestimmter Frequenz und Phasenverschiebung wird je nach Drehrichtung eine Auf- oder Abwärtsbewegung der magnetischen Wanderfeldlinien in der Schmelze **11** erzielt.

**[0054]** Die geometrischen Maße der Spulenwindungen **9**, namentlich die Windungshöhe  $H$ , die Windungsbreite  $B$  und der Windungsabstand  $A$ , werden mit Hilfe einer numerischen Modellierung so gefertigt, dass die in die Schmelze eingekoppelte Induktion und Stärke der magnetischen Feldlinien die für die Hemmung der Konvektion erforderliche Gegenkraft erzeugt. Gleichzeitig muss eine Spulenlänge  $L_a$ ,  $L_b$ ,  $L_c$  pro Spule **1a**, **1b**, **1c** und ein Windungsquerschnitt  $Q$  der Spulenwindungen **9** einen solchen Widerstand ergeben, dass bei Stromdurchgang bestimmter Stärke die erforderliche Wärme zum Schmelzen erzeugt wird.

**[0055]** Dazu muss die benötigte Energie in kW bekannt sein. Mit dem nötigen Strom für die Erzeugung eines entsprechend großen magnetischen Flusses kann dann nach dem Ohmschen Gesetz der Querschnitt der Spulen berechnet werden.

**[0056]** [Fig. 3I](#) bis [Fig. 3III](#) zeigen in schematischer Darstellung die Stabilisierungselemente **3a**, **3b**, **3c**, **3d** aus Hochtemperaturkeramik.

**[0057]** So wird in [Fig. 3I](#) die schematische Darstellung der Stabilisierungselemente **3a**, **3b**, mit nutförmige Einkerbungen **4** dargestellt. Die nutförmigen Einkerbungen **4** weisen solche Abmaße auf, dass diese in die Spulenwindungen **9** der Spulen **1a**, **1b**, **1c** passen. Auf diese Weise wird der Spulenabstand  $A$  der Spulen **1a**, **1b**, **1c** beeinflusst. Die Stabilisierungselemente **3a**, **3b**, **3c**, **3d** wirken als Distanzhaltestäbe zwischen den Windungen.

**[0058]** [Fig. 3II](#) zeigt, wie die Spulenwindungen **9** der Spulen **1a**, **1b**, **1c** in die nutförmigen Einkerbungen **4** der Stabilisierungselemente **3a**, **3b**, **3c**, **3d** greifen.

**[0059]** [Fig. 3III](#) zeigt eine andere Ausgestaltung der Stabilisierungselemente **3a**, **3b**, **3c**, **3d** in Form von Plättchen **14** aus Korund, die auf einen zylindrischen Stab geschoben sind.

**[0060]** Alternativ können die nutförmigen Einkerbungen **4** durch diese Plättchen **14** aus entsprechendem Material auf die Stäbe geschoben und zwischen den Windungen platziert werden. Diese Plättchen **14** können gleiche aber auch verschiedene Dicken besitzen und somit ebenfalls eine Variation der Windungsabstände ermöglichen. Eine Fixierung der Plättchen **14** durch die Stabilisierungselemente **3a**, **3b**, **3c**, **3d** ist notwendig um die, durch die Vibration des Heizers ausgelöste Bewegung, zu begrenzen.

**[0061]** In Tabelle 1 werden die Ergebnisse von Berechnungen zu Frequenz, Phasenverschiebung und zur Geometrie der Spulenwindungen **9** sowie zur erzeugten elektrischen Leistung für drei wichtige Halbleitermaterialien: Germanium (Ge), Galliumarsenid (GaAs) und Galliumantimonid (GaSb), aufgezeigt. Für die Messungen und Berechnungen der Größen wurde eine vertikale Bridgman-Züchtungsapparatur (VGF – Vertical Gradient Freeze) verwendet. Zum Aufschmelzen der Materialien Ge, GaAs und GaSb wird ein Strom von 450 A

und eine Leistung um 6 kW in die Heizeinrichtung **1** eingespeist. Die magnetische Induktion liegt im Bereich um 4 mT–5 mT. Aus den Optimierungsberechnungen ergeben sich für alle drei Materialien die folgenden Spulenparameter der Heizeinrichtung: Windungsbreite  $B = 50$  mm, Windungshöhe  $H = 10$  mm, Windungsabstand  $A = 4$  mm, Spulenlänge  $L_a, L_b, L_c$  der Spulen **1a, 1b, 1c** = 66 mm. Für eine verlustarme Stromzuleitung müssen die Stromzuführungsschienen **2a, 2b, 2c** und **2m** mindestens einen Querschnitt von 25 mm × 70 mm aufweisen.

Tabelle 1:

Parameter	Ge	GaAs	GaSb
Frequenz $f$ [Hz]	250	500	300
Phasenwinkel $N$ [°]	60	60	70
Heizleistung $P$ [kW]	2,4	2,2	2,0
Windungsabstand $A$ [mm]	4	4	4
Windungsbreite $B$ [mm]	50	50	50
Windungshöhe $H$ [mm]	10	10	10

**[0062]** In **Fig. 4** wird die numerische Modellierung der Verteilung der vertikalen magnetischen Kraftkomponente je Volumenelement über den Umfang der Schmelzoberfläche gezeigt. Die Linie mit den Kreuzen als Wertepunkte stellt die magnetische Kraftkomponente  $F_z$ , bei Verwendung von Stromzuführungsschienen, die koaxial nahe am Mantel der Heizeinrichtung **1** ausgeführt sind, dar. Die Linie mit den Dreiecken als Wertepunkte zeigt die Verteilung der magnetischen Kraftkomponenten bei Verwendung der erfindungsgemäßen als Winkelteil ausgestalteten „kranförmigen“ Stromzuführungsschienen **2a, 2b, 2c, 2m**. Aus der Darstellung wird der erhebliche Einfluss des Stromanteils in den Zuführungen auf das eingekoppelte Magnetfeld und dessen Kraftwirkung in der Schmelze ersichtlich. Ohne die erfindungsgemäßen kranförmigen von weit außen zu den Windungen geführten Stromzuführungen wird durch den fließenden Strom in eben diesen Zuführungen ein unerwünschtes Magnetfeld erheblicher Größe erzeugt, welches die Symmetrie des gesamten Aufbaus deutlich stört und über elektronische Maßnahmen nur schwer zu beeinflussen ist. In einem Magnetheizer muss ein bestimmter Strom fließen, damit ein Magnetfeld erzeugt werden kann. Mit Hilfe der erfindungsgemäßen kranförmigen Zuführungen wird eine deutliche bis vollständige Minderung der gezeigte asymmetrischen Auswirkungen erreicht.

## Bezugszeichenliste

<b>1</b>	Heizeinrichtung
<b>1a</b>	Spule
<b>1b</b>	Spule
<b>1c</b>	Spule
<b>2a</b>	Stromzuführungsschiene
<b>2b</b>	Stromzuführungsschiene
<b>2c</b>	Stromzuführungsschiene
<b>2m</b>	Stromzuführungsschiene
<b>3a</b>	Stabilisierungselement
<b>3b</b>	Stabilisierungselement
<b>3c</b>	Stabilisierungselement
<b>3d</b>	Stabilisierungselement
<b>4</b>	nutförmige Einkerbung
<b>5a</b>	horizontale Schiene
<b>5b</b>	horizontale Schiene
<b>5c</b>	horizontale Schiene
<b>5m</b>	horizontale Schiene
<b>5n</b>	horizontale Schiene
<b>6a</b>	vertikale Schiene
<b>6b</b>	vertikale Schiene
<b>6c</b>	vertikale Schiene
<b>6m</b>	vertikale Schiene

<b>7</b>	Schienenlänge der horizontalen Schienen
<b>8</b>	Kristall
<b>9</b>	Spulenwindung
<b>10</b>	Züchtungskammer
<b>11</b>	Schmelze
<b>12</b>	Tiegel
<b>13</b>	Energieversorgungseinrichtung
<b>14</b>	Plättchen
<b>A</b>	Windungsabstand
<b>H</b>	Windungshöhe
<b>B</b>	Windungsbreite
<b>n</b>	Windungszahl
<b>L<sub>a</sub></b>	Spulenlänge
<b>L<sub>b</sub></b>	Spulenlänge
<b>L<sub>c</sub></b>	Spulenlänge
<b>Q</b>	Windungsquerschnitt
<b>I</b>	Innendurchmesser der Heizeinrichtung



**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**

- DE 2107646 [0002, 0004]
- DE 3750382 T2 [0002]
- JP 59121183 A [0005]
- DE 10102126 A1 [0007]
- DE 10349339 A1 [0007]

**Zitierte Nicht-Patentliteratur**

- IBM Technical Disclosure Bulletin Vol. 23 (1980) 2756 [0002]
- Jpn. J. Appl. Phys. 19 (1980) 133 [0002]
- IBM Technical Disclosure Bulletin Vol. 25 (1982) 2277 [0002]
- 3.2.-24 auf S. 703 in K. Wilke, J. Bohr, Kristallzüchtung, Vlg. H. Deutsch and Thun, Frankfurt a. M. 1988 [0003]
- Socoluic, Magnetohydrodynamics 39 (2003) 187 [0006]
- Schwesig et al. J. Crystal Growth 266 (2004) 224 [0006]

### Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Züchtung von Kristallen aus elektrisch leitenden Schmelzen, mindestens aufweisend einen in einer Züchtungskammer (10) angeordneten, eine Schmelze (11) enthaltenden Tiegel (12), eine den Tiegel (12) umgebende Heizeinrichtung (1), welche als Mehrspulenordnung von übereinander angeordneten Spulen (1a, 1b, 1c) ausgeführt ist, wobei die Spulen (1a, 1b, 1c) stufenförmige oder stufenlose Spulenwindungen (9) aufweisen und an den Spulen (1a, 1b, 1c) Stromzuführungsschienen (2a, 2b, 2c, 2m) angebracht sind, die elektrisch mit einer außerhalb der Züchtungskammer (10) angeordneten Energieversorgungseinrichtung (13) verbunden sind, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Heizeinrichtung (1) Stabilisierungselemente (3a), (3b), (3c), (3d) an den Spulenwindungen (9) aufweist und die Stromzuführungsschienen (2a), (2b), (2c), (2m) in Form eines Winkelteiles ausgestaltet sind.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Stabilisierungselemente (3a), (3b), (3c), (3d) als zylindrische Stäbe mit nutförmigen Einkerbungen (4) ausgestaltet sind.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Stabilisierungselemente (3a), (3b), (3c), (3d) als zylindrische Stäbe mit Plättchen (14) ausgestaltet sind.
4. Vorrichtung nach Anspruch 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Stabilisierungselemente (3a), (3b), (3c), (3d) koaxial entlang der Spulenaußenseite zwischen den Stromzuführungsschienen (2a), (2b), (2c), (2m) angeordnet sind, wobei die nutförmigen Einkerbungen (4) in die Spulenwindungen (9) der Spulen (1a), (1b), (1c) greifen oder die Plättchen (14) zwischen den Spulenwindungen (9) liegen.
5. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens zwei Stabilisierungselemente (3a), (3b), (3c), (3d) vorhanden sind.
6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine nutförmig Einkerbung (4) an den Stabilisierungselementen (3a), (3b), (3c), (3d) vorhanden ist.
7. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Stabilisierungselemente (3a), (3b), (3c), (3d) mindestens ein Plättchen (14) aufweisen.
8. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Stromzuführungsschienen (2a), (2b), (2c), (2m) mindestens eine horizontale Schiene (5a), (5b), (5c), (5m) und eine vertikale Schiene (6a), (6b), (6c), (6m) aufweisen, wobei diese zueinander in Form eines Winkelteiles miteinander verbunden sind.
9. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Schienenlänge 7 der horizontalen Schienen (5a), (5b), (5c), (5m) mindestens einer Eindringtiefe des magnetischen Flusses bei einer jeweilig verwendeten Frequenz entspricht.
10. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass die horizontale Schiene (5a), (5b), (5c), (5m) der Stromzuführungsschienen (2a), (2b), (2c), (2m) mit mindestens einer Spule (1a), (1b), (1c) elektrisch leitend verbunden ist.
11. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass die vertikalen Schienen (6a), (6b), (6c), (6m) der Stromzuführungsschienen (2a), (2b), (2c), (2m) außerhalb der Züchtungskammer (10) mit der Energieversorgungseinrichtung (13) elektrisch verbunden sind.
12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass eine Stromzuführungsschiene (2m) zwei horizontale Schienen (5m, 5n) aufweist, die mit den Spulen elektrisch verbunden ist.
13. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass eine vertikale Schiene einer Stromzuführungsschiene mit zwei aneinander grenzenden Spulen verbunden ist.
14. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Spulenwindungen (9) einen Windungsquerschnitt (Q) mit einer Windungsbreite (B) und einer Windungshöhe (H) im Verhältnis von 10:1 bis 1:10 aufweisen.
15. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 14 dadurch gekennzeichnet, dass die Spulenwindungen

(9) einen Windungsquerschnitt (Q) mit der Windungsbreite (B) und der Windungshöhe (H) im Verhältnis von 5:1 aufweisen.

16. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass der Windungsquerschnitt (Q) eine beliebige geometrische Form aufweist.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

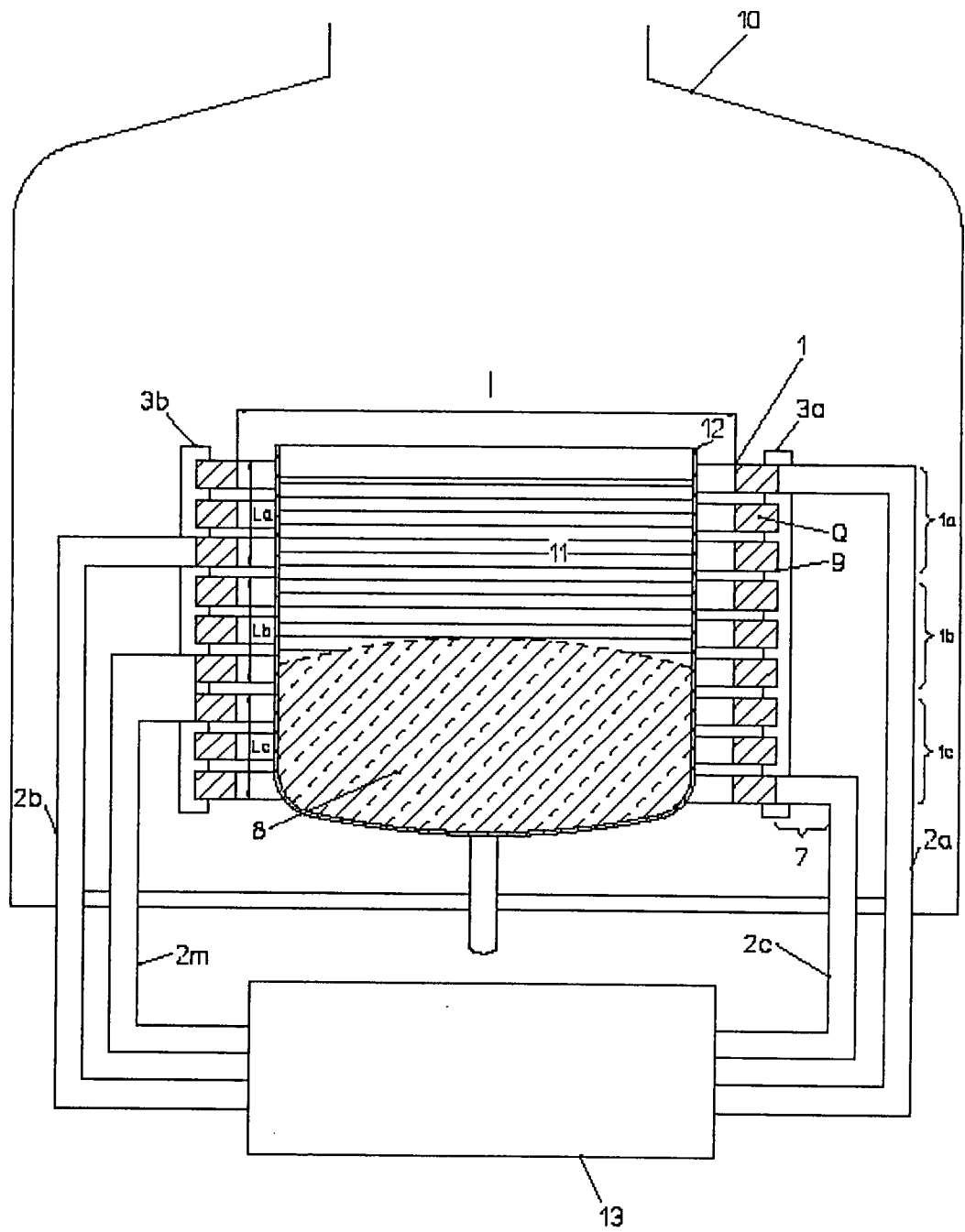


Fig. 1

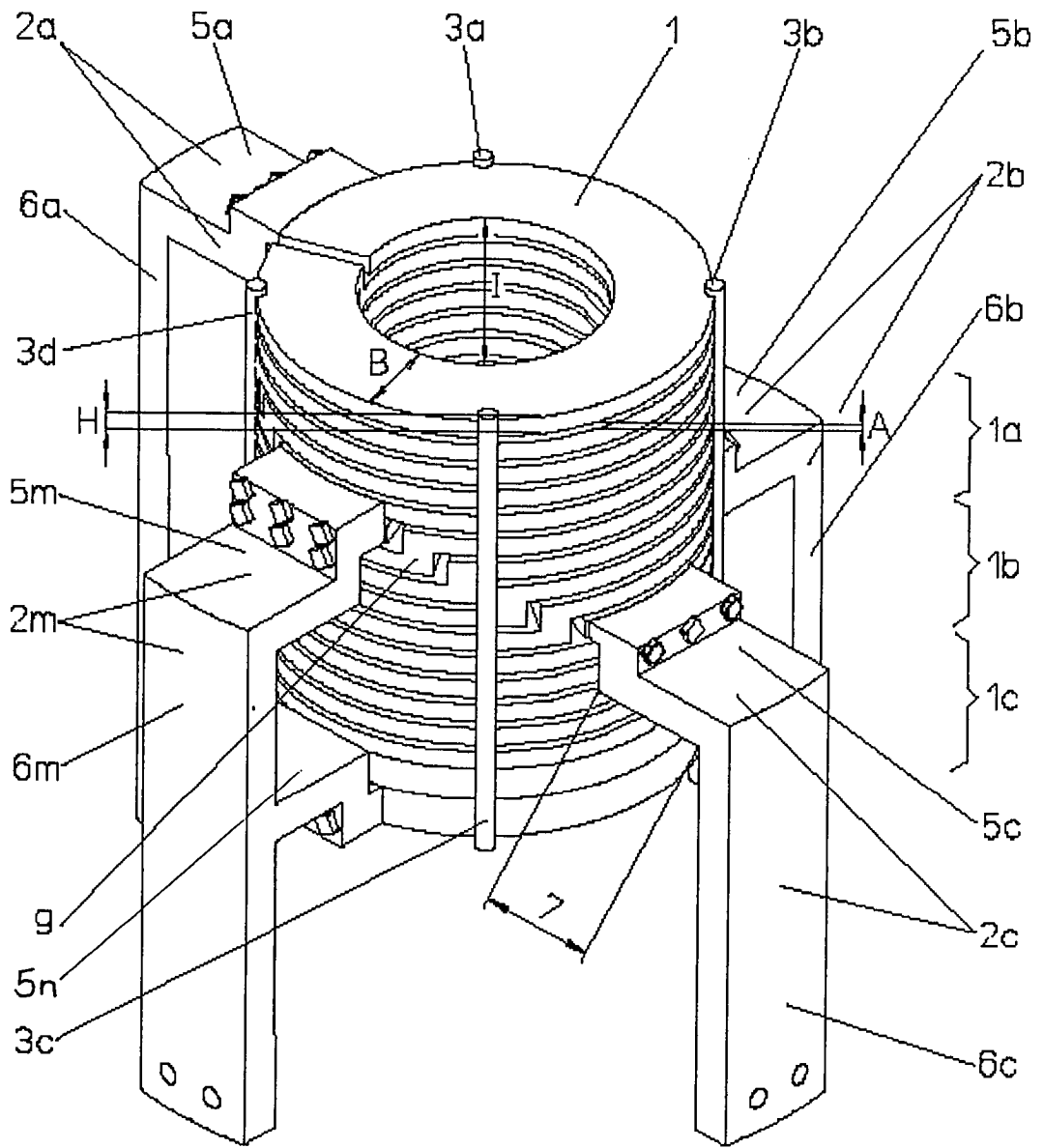


Fig. 2

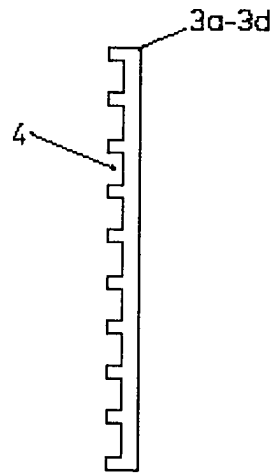


Fig. 3 I

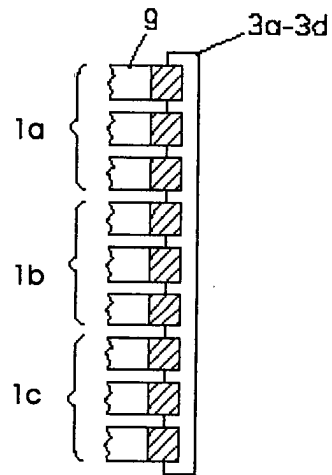


Fig. 3 II

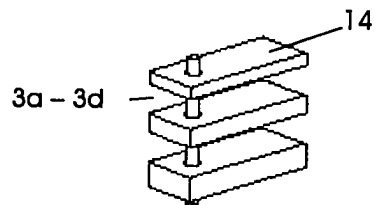


Fig. 3 III

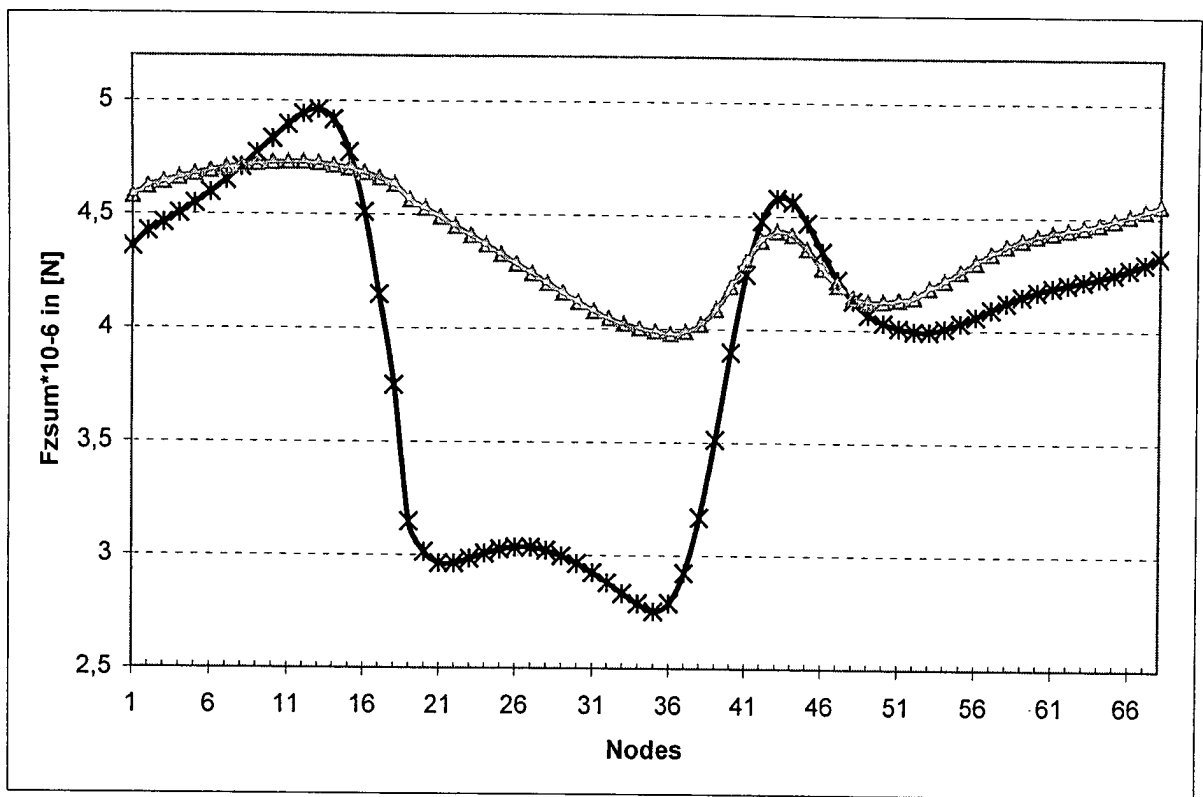


Fig. 4