



(19)  
 Bundesrepublik Deutschland  
 Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2007 049 778 A1** 2008.05.15

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2007 049 778.6**

(22) Anmeldetag: **17.10.2007**

(43) Offenlegungstag: **15.05.2008**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **C30B 15/20** (2006.01)

**C30B 15/00** (2006.01)

**C30B 29/06** (2006.01)

**C30B 29/08** (2006.01)

**C30B 29/40** (2006.01)

**C30B 29/32** (2006.01)

**C30B 29/30** (2006.01)

**C30B 29/28** (2006.01)

**C30B 29/10** (2006.01)

(30) Unionspriorität:  
**10-2006-0100912 17.10.2006 KR**

(71) Anmelder:  
**Siltron Inc., Gumi, Gyeongsangbuk, KR**

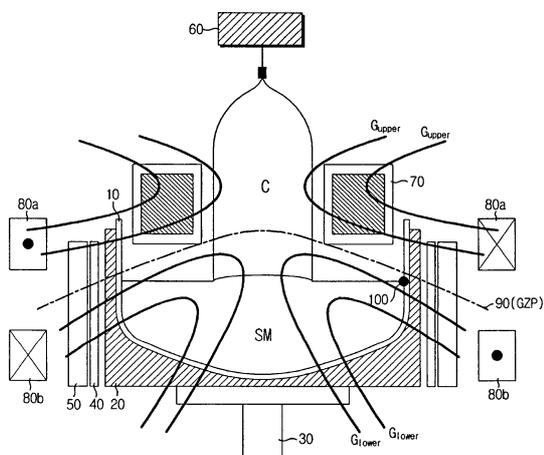
(74) Vertreter:  
**Habermann, Hruschka & Schnabel, 81679 München**

(72) Erfinder:  
**Hong, Young-Ho, Gumi, KR; Lee, Sang-Jun, Gumi, KR; Jeong, Seong-Oh, Gumi, KR; Lee, Hong-Woo, Gumi, KR**

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Herstellen eines Halbleitereinkristalls durch das Czochralski-Verfahren sowie Einkristallrohling und Wafer, die unter Verwendung derselben hergestellt werden**

(57) Zusammenfassung: Ein Verfahren zum Herstellen eines Halbleitereinkristalls verwendet einen Czochralski-Prozess (CZ-Prozess), bei dem ein Keimkristall in eine Schmelze aus Halbleiterrohmaterial und Dotierstoff, die in einem Schmelztiegel aufgenommen sind, getaucht wird, woraufhin der Keimkristall langsam nach oben gezogen und dabei gedreht wird, um einen Halbleitereinkristall aufzuwachsen zu lassen. Hierbei wird ein asymmetrisches Magnetfeld des CUSP-Typs, das in Bezug auf die ZGP (Null-Gauß-Ebene) unterschiedliche obere und untere Magnetfeldstärken besitzt, wobei die vertikale Komponente des Magnetfeldes 0 ist, an den Schmelztiegel angelegt, so dass das Profil des spezifischen Widerstandes, das in Längsrichtung des Kristalls theoretisch berechnet worden ist, in Längsrichtung des Kristalls erweitert wird. Somit wird die Dicke einer Diffusionsgrenzschicht in der Nähe einer Festkörper/Flüssigkeit-Grenzfläche erhöht, um den effektiven Segregationskoeffizienten des Dotierstoffs zu erhöhen, wodurch das Profil des spezifischen Widerstandes in Längsrichtung des Kristalls erweitert wird, so dass die Hauptlänge des Einkristalls vergrößert wird und die Produktivität verbessert wird.



**Beschreibung**

## HINTERGRUND DER ERFINDUNG

## Gebiet der Erfindung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zum Herstellen eines Halbleitereinkristalls und insbesondere auf ein Verfahren zum Herstellen eines Halbleitereinkristalls, das ein Profil des spezifischen Widerstandes für jede Einkristalllänge während des Wachstums des Einkristalls unter Verwendung des Czochralski-Verfahrens (im Folgenden "CZ-Prozess" genannt) erweitern kann, einen Einkristallrohling, der unter Verwendung des Verfahrens hergestellt wird, und einen Wafer, der unter Verwendung des Rohlings hergestellt wird.

## Beschreibung des Standes der Technik

**[0002]** Im Allgemeinen wird ein Siliziumeinkristall, der als Material für die Produktion von elektronischen Bauelementen, z.B. von Halbleiterbauelementen, verwendet wird, unter Verwendung des CZ-Prozesses hergestellt. Bei dem CZ-Prozess wird polykristallines Silizium in einen Quarz-Schmelztiegel gegeben und oberhalb von 1400 °C geschmolzen wird, woraufhin ein Keimkristall in die geschmolzene Siliziumschmelze getaucht wird und dann langsam gezogen wird, um einen Kristall wachsen zu lassen. Dies ist in dem Artikel "Silicon Processing for the VLSI Era (Band 1, Lattice Press (1986), Sunset Beach, CA) von S. Wolf und R. N. Tauber gut beschrieben.

**[0003]** Während ein Siliziumeinkristall unter Verwendung des CZ-Prozesses wächst, wird ein Dotierstoff eines Gruppe-III- oder eines Gruppe-V-Elements wie etwa B, Al, Ga, P, As und Sb in Abhängigkeit von den Bedingungen der elektrischen Charakteristik eines Halbleiters, die von einem Verbraucher gefordert werden, hinzugefügt. Während ein Siliziumeinkristall wächst, wird der Dotierstoff zu dem Kristall gleichmäßig hinzugefügt. Zu diesem Zeitpunkt sollte der in den Kristall eingeführte Dotierstoff keine zu hohe Konzentration haben. Bei einer Konzentration oberhalb eines bestimmten Niveaus bilden der Dotierstoff und das Silizium keine stabile Lösung, vielmehr fällt der Dotierstoff als Niederschlag aus.

**[0004]** Im Allgemeinen sind die äquivalenten Konzentrationen von Dotierstoffen, die in einer Siliziumschmelze gleichmäßig verteilt sind, im festen Zustand anders als im geschmolzenen Zustand. Daher definiert man das Verhältnis zwischen der Konzentration des Dotierstoffs im geschmolzenen Zustand und der Konzentration des Dotierstoffs im festen Zustand als effektiven Segregationskoeffizienten, wobei jeder Dotierstoff je nach Art des Elements einen bestimmten effektiven Segregationskoeffizienten besitzt. Falls der effektive Segregationskoeffizient 1 ist, ist die Dotierstoffkonzentration in einer Siliziumschmelze theoretisch gleich der Dotierstoffkonzentration in einem Siliziumeinkristall. Dotierstoffe (B, P), die beim Wachstum eines Siliziumeinkristalls verwendet werden, besitzen jedoch einen effektiven Segregationskoeffizienten kleiner als 1, wobei, da der effektive Segregationskoeffizient kleiner als 1 ist, die Dotierstoffkonzentration in einer Siliziumschmelze höher als die Dotierstoffkonzentration in einem Siliziumeinkristall ist. Aus diesem Grund neigt ein Siliziumeinkristall dazu, in seinem unteren Abschnitt eine höhere Dotierstoffkonzentration als in seinem oberen Abschnitt zu zeigen. Der spezifische Widerstand in dem Siliziumeinkristall wird durch die Konzentration des Dotierstoffs, der in den Einkristall eingeleitet wird, beeinflusst. Falls ein Dotierstoff mit einem effektiven Segregationskoeffizienten kleiner als 1 verwendet wird, ändert der Siliziumeinkristall seinen spezifischen Widerstand über die Länge des Kristalls. Falls beispielsweise Bor als Dotierstoff beim Wachsen eines Siliziumeinkristalls verwendet wird, neigt der spezifische Widerstand zu einer Abnahme in Längsrichtung des Kristalls.

**[0005]** Indessen kann in einem Halbleitereinkristall, der unter Verwendung des CZ-Prozesses gewachsen wurde, nur ein Kristallbereich, der eine bestimmte Widerstandsbedingung sowie eine bestimmte Störstellenkonzentrationsbedingung und eine bestimmte Sauerstoffkonzentrationsbedingung, die von einem Anwender gefordert werden, für die Herstellung irgendeines Produkts verwendet werden. Hierbei wird eine Länge eines Halbleitereinkristalls, die sämtliche Anforderungen des Kunden erfüllt, "eine Hauptlänge" ("a prime length") genannt. Falls ein Siliziumeinkristall unter Verwendung eines Dotierstoffs gewachsen wird, der einen effektiven Segregationskoeffizienten besitzt, der kleiner als 1 ist, nimmt der spezifische Widerstand bei Betrachtung in Längsrichtung des Einkristalls langsam ab.

**[0006]** Zu diesem Zeitpunkt wird in dem Kristallbereich, der einen spezifischen Widerstand hat, der eine bestimmte Bedingung erfüllt, die Hauptlänge nur ein Teilstück des Kristallbereichs, das Kundenspezifikationen wie etwa die Störstellenkonzentrationsbedingung und die Sauerstoffkonzentrationsbedingung erfüllt, sein.

**[0007]** Die Technik zum Steuern der Störstellenkonzentration und der Sauerstoffkonzentration ist zwar weit fortgeschritten, die Technik zum Steuern eines effektiven Segregationskoeffizienten eines Dotierstoffs für die Steuerung des Profils des spezifischen Widerstandes in Längsrichtung eines Halbleitereinkristalls befindet sich jedoch noch immer in den Anfängen. Obwohl eine theoretische Formel für den effektiven Segregationskoeffizienten eines Dotierstoffs durch Kristallwachstumsexperimente von nicht mehr als 3 Zoll aufgestellt wurde, gibt es kein Beispiel einer Technik zum Steuern des Profils des spezifischen Widerstandes eines Kristalls durch Steuerung des effektiven Segregationskoeffizienten während des Einkristallwachstums. Somit wird eine Hauptlänge eines Einkristalls, der unter Verwendung des CZ-Prozesses gewachsen ist, durch ein Profil des spezifischen Widerstandes dominiert, das hauptsächlich durch einen effektiven Segregationskoeffizienten des Dotierstoffs bestimmt ist. Der Grund hierfür besteht darin, dass andere Kundenanforderungen unter Verwendung einer aktuellen Einkristall-Wachstumstechnologie einfach gesteuert werden können.

**[0008]** Beispielsweise besitzt Bor einen effektiven Segregationskoeffizienten im Bereich von 0,73 bis 0,75, wobei ein eigenes Profil des spezifischen Widerstandes in Längsrichtung des Einkristalls in Übereinstimmung mit einem solchermaßen bestimmten numerischen Bereich bestimmt wird und eine Hauptlänge, die die Herstellung eines Produkts zulässt, in Übereinstimmung mit dem Profil des spezifischen Widerstandes bestimmt wird. Somit wirkt der effektive Segregationskoeffizient des Dotierstoffs als ein wesentlicher Faktor, der die Produktivität pro Kilogramm bestimmt, wenn ein Halbleitereinkristall unter Verwendung des CZ-Prozesses wächst. Falls das Profil des spezifischen Widerstandes in Längsrichtung des Kristalls mittels der Steuerung des effektiven Segregationskoeffizienten des Dotierstoffs erweitert würde, könnte als Folge davon die Hauptlänge stark erhöht werden. Hierbei bedeutet die Erweiterung des Profils des spezifischen Widerstandes, dass der spezifische Widerstand in einem bestimmten Verhältnis erhöht wird, wenn die effektiven Segregationskoeffizienten vor bzw. nach der Steuerung in Längsrichtung des Kristalls vom selben Punkt aus gemessen werden.

**[0009]** Um das Profil des spezifischen Widerstandes zu erweitern, wenn ein Halbleitereinkristall unter Verwendung des CZ-Prozesses wächst, wurden herkömmlich Stickstoff (N) oder Kohlenstoff (C) als Störstellen hinzugefügt oder ein Halbleiterrohling, der unter Verwendung eines Einkristalls in einer Sauerstoff- oder Stickstoffgasumgebung gewachsen wurde, wurde bei einer hohen Temperatur thermisch behandelt. Bei einem weiteren Verfahren wurde zusätzlich ein drittes Element (z. B. Ba, P, Ge oder Al) als Dotierstoff zu dem zusätzlich für die Steuerung des effektiven Segregationskoeffizienten hinzugefügten Dotierstoff hinzugefügt, was "Codotierung" genannt wird.

**[0010]** Diese herkömmlichen Verfahren haben eine Grenze insofern, als sie nur für die Herstellung eines Wafers mit begrenzten Anwendungen wie etwa Wafer mit hohem Widerstand oder Wafer mit niedrigem Widerstand verwendet werden können. Außerdem hat das Codotierungsverfahren Charakteristiken, die keine geforderten Eigenschaften bei der Herstellung eines Halbleiters sind, oder es ist unzureichend, um einen Rohling hoher Qualität wie etwa einen defektfreien Rohling herzustellen.

**[0011]** Für einen Hersteller, der einen Halbleitereinkristall herstellt, ist es wichtig, die Qualität des Kristalls selbst zu verbessern, es ist jedoch viel wichtiger, die Hauptlänge durch Erweitern eines Profils des spezifischen Widerstandes in einer Längsrichtung des Kristalls zu erhöhen, um die Produktivität zu steigern. Da es jedoch, wie oben erwähnt wurde, schwierig ist, den effektiven Segregationskoeffizienten, d. h. das Profil des spezifischen Widerstandes zu steuern, liegt die Hauptlänge unabhängig von der Verbesserung der Kristallqualität unvermeidlich fest, so dass hinsichtlich der Steigerung der Produktivität von Produkten eine grundsätzliche Grenze besteht.

#### ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

**[0012]** Die vorliegende Erfindung ist so entworfen, dass die Probleme des Standes der Technik gelöst werden, weshalb es eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist, ein Verfahren zum Herstellen eines Halbleitereinkristalls, das das Profil des spezifischen elektrischen Widerstandes in Längsrichtung eines Kristalls durch Steuern des effektiven Segregationskoeffizienten ohne Hinzufügung eines dritten Elements als Dotierstoff wie in dem Codotierungsverfahren erweitern kann, wenn ein großkalibriger Halbleitereinkristall über 200 mm sowie ein klein- oder mittelkalibriger Halbleitereinkristall unter Verwendung des CZ-Prozesses hergestellt werden; einen Halbleitereinkristall-Rohling, der unter Verwendung des Verfahrens hergestellt wird; und einen Wafer, der unter Verwendung des Rohlings hergestellt wird, zu schaffen.

**[0013]** Eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein Verfahren zum Herstellen eines Halbleitereinkristalls, das die Produktivität durch Erweitern der Hauptlänge unter Beibehaltung einer hohen Qualität für viele verschiedene Einkristallprodukte unabhängig von klassifizierten Störstellenbereichen steigern kann,

was im Gegensatz zum Stand der Technik steht, bei dem eine Hauptlänge eines Einkristalls, der in Produkte hergestellt werden kann, bezogen auf eine Charge desselben Materials wegen der Schwierigkeit der Steuerung eines effektiven Segregationskoeffizienten fix war; einen Halbleitereinkristall-Rohling, der unter Verwendung des Verfahrens hergestellt wird; und einen Wafer, der unter Verwendung des Rohlings hergestellt wird, zu schaffen.

**[0014]** Um obige Aufgaben zu lösen, schafft die vorliegende Erfindung ein Verfahren zum Herstellen eines Halbleitereinkristalls unter Verwendung eines Czochralski-Prozesses (CZ-Prozess), bei dem ein Keimkristall in eine Schmelze aus Halbleiterrohmaterial und Dotierstoff, die in einem Schmelztiegel enthalten sind, getaucht wird, woraufhin der Keimkristall langsam nach oben gezogen wird und dabei gedreht wird, um einen Halbleitereinkristall wachsen zu lassen, wobei an den Schmelztiegel ein asymmetrisches Magnetfeld des CUSP-Typs angelegt wird, das in Bezug auf die ZGP (Null-Gauß-Ebene, Zero-Gauss-Plane) eine obere und eine untere Magnetfeldstärke, die voneinander verschieden sind, besitzt, wobei eine vertikale Komponente des Magnetfeldes 0 ist, so dass das Profil des spezifischen Widerstandes, das theoretisch in Längsrichtung des Kristalls berechnet wird, in Längsrichtung des Kristalls erweitert ist.

**[0015]** Gemäß der vorliegenden Erfindung wird der theoretisch berechnete spezifische Widerstand unter Verwendung der folgenden Gleichung berechnet:

$$\rho_{theory} = \rho_{seed} (1 - S)^{(1 - k_e)}$$

wobei

$\rho_{theory}$  ein theoretischer spezifischer Widerstand ist,  
 $\rho_{seed}$  der spezifische Widerstand des Keimkristalls ist,  
 $S$  das Erstarrungsverhältnis ist, und  
 $k_e$  der effektive Segregationskoeffizient des Dotierstoffs ist.

**[0016]** Vorzugsweise ist während des Wachstums des Einkristalls eine Temperaturdifferenz zwischen einer Festkörper/Flüssigkeits-Grenzfläche und einem von der Festkörper/Flüssigkeits-Grenzfläche um 50 mm beabstandeten Punkt kleiner als 50 K. Außerdem ist während des Wachstums des Einkristalls das Verhältnis zwischen der Konvektionsgeschwindigkeit an der Festkörper/Flüssigkeits-Grenzfläche und der Konvektionsgeschwindigkeit an einem Punkt, der von der Festkörper/Flüssigkeits-Grenzfläche um 50 mm beabstandet ist, kleiner als 30.

**[0017]** Vorzugsweise ist der spezifische Widerstand, der in einem Bereich von 0 bis 1/2 L in Längsrichtung des gewachsenen Halbleitereinkristalls gemessen wird, um 0 bis 15 % höher als der theoretisch berechnete spezifische Widerstand.

**[0018]** Vorzugsweise ist der spezifische Widerstand, der in einem Bereich von 1/2 L bis 1 L in Längsrichtung des gewachsenen Halbleitereinkristalls gemessen wird, um 0 bis 40 % höher als der theoretisch berechnete spezifische Widerstand.

**[0019]** Gemäß einem Aspekt der vorliegenden Erfindung besitzt ein unterer Abschnitt des asymmetrischen Magnetfeldes in Bezug auf die ZGP eine größere Stärke als in einem oberen Abschnitt hiervon. In diesem Fall besitzt die ZGP ein nach oben konvexes parabolisches Muster, wobei ein oberer Scheitelpunkt des parabolischen Musters oberhalb einer Halbleiterschmelze positioniert ist.

**[0020]** Gemäß einem weiteren Aspekt der vorliegenden Erfindung besitzt ein oberer Abschnitt des asymmetrischen Magnetfeldes in Bezug auf die ZGP eine größere Stärke als ein unterer Abschnitt hiervon. In diesem Fall besitzt die ZGP ein nach unten konvexes parabolisches Muster, wobei ein unterer Scheitelpunkt des parabolischen Musters in einer Halbleiterschmelze positioniert ist.

**[0021]** Bei der vorliegenden Erfindung ist der Halbleitereinkristall ein Si-, Ge-, GaAs-, InP-, LN(LiNbO<sub>3</sub>)-, LT(LiTaO<sub>3</sub>)-, YAG(Yttrium-Aluminium-Granat)-, LBO(LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>)- oder CLBO(CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub>)-Einkristall.

**[0022]** Gemäß der vorliegenden Erfindung wird ein asymmetrisches Magnetfeld angelegt, wenn ein Halbleitereinkristall unter Verwendung des CZ-Prozesses wächst, wobei die Konvektionsgeschwindigkeit und die Temperaturverteilung der Halbleiterschmelze gesteuert werden und somit ein anomaler Fluss der Halbleiter-

schmelze begrenzt wird. Dadurch wird die Dicke einer Diffusionsgrenzschicht in der Nähe der Festkörper/Flüssigkeits-Grenzfläche erhöht, um den effektiven Segregationskoeffizienten des Dotierstoffs zu erhöhen, wodurch das Profil des spezifischen Widerstandes in Längsrichtung des Kristalls erweitert wird. Somit kann die vorliegende Erfindung die Produktivität gegenüber einem herkömmlichen Verfahren verbessern.

#### KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

**[0023]** Weitere Aufgaben und Aspekte der vorliegenden Erfindung werden deutlich anhand der folgenden Beschreibung von Ausführungsformen, die auf die beigefügten Zeichnungen Bezug nimmt, bei denen:

**[0024]** [Fig. 1](#) eine schematische Ansicht ist, die eine Vorrichtung zum Herstellen eines Halbleitereinkristalls zeigt, die für die Implementierung eines Verfahrens zum Herstellen eines Siliziumeinkristalls gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung verwendet wird;

**[0025]** [Fig. 2](#) Simulationsergebnisse der Magnetfeldverteilung um eine Siliziumschmelze und einen Quarzschmelztiegel und die ZGP (Zero Gauss Plane) in dem Fall zeigt, bei dem ein asymmetrisches Magnetfeld des CUSP-Typs an den Quarzschmelztiegel angelegt wird, während ein Siliziumeinkristall wächst;

**[0026]** [Fig. 3](#) ein Graph ist, der einen theoretischen spezifischen Widerstand (◆) und einen tatsächlich gemessenen spezifischen Widerstand (■) in Kristallrichtung eines 8-Zoll-Siliziumeinkristalls zeigt, der hergestellt wird, ohne dass an ihn ein Magnetfeld angelegt wird (Vergleichsbeispiel 1);

**[0027]** [Fig. 4](#) ein Graph ist, der einen theoretischen spezifischen Widerstand (◆) und einen tatsächlich gemessenen spezifischen Widerstand (■) in Kristallrichtung eines 8-Zoll-Siliziumeinkristalls zeigt, der hergestellt wird, indem an ihn ein symmetrisches Magnetfeld des CUSP-Typs ( $R = 1$ ) angelegt wird (Vergleichsbeispiel 2);

**[0028]** [Fig. 5](#) ein Graph ist, der einen theoretischen spezifischen Widerstand (◆) und einen tatsächlich gemessenen spezifischen Widerstand (■) in Kristallrichtung eines Siliziumeinkristalls zeigt, der hergestellt wird, indem an ihn ein asymmetrisches Magnetfeld ( $R = 2,3$ ) angelegt wird, das in Übereinstimmung mit einer ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wie in (a) von [Fig. 2](#) gezeigt beschaffen ist;

**[0029]** [Fig. 6](#) ein Graph ist, der einen theoretischen spezifischen Widerstand (◆) und einen tatsächlich gemessenen spezifischen Widerstand (■) in Kristallrichtung eines 8-Zoll-Siliziumeinkristalls zeigt, der hergestellt wird, indem an ihn ein asymmetrisches Magnetfeld ( $R = 1,36$ ) angelegt wird, das in Übereinstimmung mit einer zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wie in (b) von [Fig. 2](#) beschaffen ist;

**[0030]** [Fig. 7](#) ein Graph ist, der Simulationsergebnisse der Temperaturverteilung einer Siliziumschmelze bei der in [Fig. 2](#) gezeigten ersten bzw. zweiten Ausführungsform zeigt; und

**[0031]** [Fig. 8](#) ein Graph ist, der Simulationsergebnisse der Konvektionsgeschwindigkeitsverteilung für die Siliziumschmelze bei dem in [Fig. 2](#) gezeigten ersten bzw. zweiten Ausführungsformen zeigt.

**[0032]** Bezugszeichen wesentlicher Elemente:

#### Bezugszeichenliste

<b>SM</b>	Siliziumschmelze
<b>10</b>	Schmelztiegel
<b>20</b>	Schmelztiegelgehäuse
<b>30</b>	Schmelztiegel-Dreheinheit
<b>40</b>	Heizeinheit
<b>50</b>	Isoliereinheit
<b>60</b>	Einkristall-Zieheinheit
<b>70</b>	Wärmeabschirmung

#### BESCHREIBUNG DER BEVORZUGTEN AUSFÜHRUNGSFORM

**[0033]** Im Folgenden werden bevorzugte Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung im Einzelnen mit Bezug auf die beigefügten Zeichnungen beschrieben. Vor dem Lesen der Beschreibung sollte klar sein, dass die in der Beschreibung und in den beigefügten Ansprüchen verwendeten Ausdrücke nicht als auf allgemeine

Bedeutungen und Wörterbuchbedeutungen eingeschränkt angesehen werden sollten, sondern anhand der Bedeutungen und Begriffe, die den technischen Aspekten der vorliegenden Erfindung entsprechen, auf der Grundlage des Prinzips, dass dem Erfinder erlaubt ist, Ausdrücke zum Zweck der besten Erläuterung geeignet zu definieren, interpretiert werden sollen. Daher ist die hier gegebene Beschreibung lediglich ein bevorzugtes Beispiel, das nur dem Zweck der Erläuterung dient, jedoch den Schutzbereich der Erfindung nicht begrenzen soll, so dass andere Äquivalente gebildet und Abwandlungen daran vorgenommen werden können, ohne vom Erfindungsgedanken und vom Schutzbereich der Erfindung abzuweichen.

**[0034]** Die Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung, die im Folgenden erläutert werden, basieren auf dem Wachstum eines Siliziumhalbleiter-Einkristalls unter Verwendung des CZ-Prozesses, der Erfindungsgedanke sollte jedoch nicht so interpretiert werden, dass er lediglich auf das Wachstum eines Siliziumhalbleiter-Einkristalls begrenzt ist. Daher sollte angemerkt werden, dass der Erfindungsgedanke bei allen Arten von Verbindungshalbleiter-Einkristallen einschließlich Si, Ge, GaAs, InP, LN(LiNbO<sub>3</sub>, LT(LiTaO<sub>3</sub>), YAG(Yttrium-Aluminium-Granat), LBO(LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>) oder CLBO(CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub>) angewendet werden kann.

**[0035]** [Fig. 1](#) ist eine schematische Darstellung, die eine Vorrichtung für die Herstellung eines Halbleitereinkristalls zeigt, die verwendet wird, um ein Verfahren für die Herstellung eines Siliziumeinkristalls gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung durchzuführen.

**[0036]** Wie in [Fig. 1](#) gezeigt ist, umfasst eine Halbleitereinkristall-Herstellungsvorrichtung einen Quarzschmelztiegel **10** für die Aufnahme einer Siliziumschmelze (SM), die durch Schmelzen von polykristallinem Silizium und eines Dotierstoffs bei hoher Temperatur erhalten wird; ein Schmelztiegelgehäuse **20**, das einen äußeren Umfang des Quarzschmelztiegels **10** umgibt und den äußeren Umfang des Quarzschmelztiegels **10** in einem vorgegebenen Muster stützt; eine Schmelztiegel-Dreheinheit **30**, die an einem unteren Ende des Schmelztiegelgehäuses **20** installiert ist, um den Quarzschmelztiegel **10** zusammen mit dem Schmelztiegelgehäuse **20** zu drehen; eine Heizeinheit **40**, die von einer Seitenwand des Schmelztiegelgehäuses **20** um eine vorgegebene Strecke beabstandet ist, um den Quarzschmelztiegel **10** zu heizen; eine Isoliereinheit **50**, die an einer äußeren Position der Heizeinheit **40** installiert ist, um zu verhindern, dass durch die Heizeinheit **40** erzeugte Wärme nach außen abgegeben wird; eine Einkristall-Zieheinheit **60**, um einen Einkristall (C) aus der in den Quarzschmelztiegel **10** aufgenommenen Schmelze SM unter Verwendung eines Keimkristalls zu ziehen; und eine Wärmeabschirmung **70**, die von einem äußeren Umfang des Einkristalls (C), der durch die Einkristall-Zieheinheit **60** gezogen wird, um eine vorgegebene Strecke beabstandet ist, um von dem Einkristall C abgegebene Wärme zu reflektieren. Diese Komponenten werden im Allgemeinen bei Halbleitereinkristall-Herstellungsvorrichtungen, die den CZ-Prozess verwenden und gemäß dem Stand der Technik bekannt sind, verwendet, weshalb sie hier nicht im Einzelnen beschrieben werden.

**[0037]** Die Halbleitereinkristall-Herstellungsvorrichtung, die bei der vorliegenden Erfindung verwendet wird, enthält zusätzlich zu den obigen Komponenten ferner Magnetfeld-Anlegeeinheiten **80a**, **80b** (im Folgenden gemeinsam mit dem Bezugszeichen **80** bezeichnet), die dazu dienen, ein Magnetfeld an den Quarzschmelztiegel **10** anzulegen. Vorzugsweise legt die Magnetfeld-Anlegeeinheit **80** ein asymmetrisches Magnetfeld  $G_{\text{upper}}$ ,  $G_{\text{lower}}$  (im Folgenden gemeinsam mit  $G$  bezeichnet) an die Hochtemperatur-SM, die in dem Quarzschmelztiegel **10** aufgenommen ist, an.

**[0038]** Vorzugsweise besitzt das asymmetrische Magnetfeld  $G$  in seinem unteren Abschnitt in Bezug auf die ZGP (Null-Gauß-Ebene, Zero Gauss Plane) **90** eine größere Stärke des Magnetfeldes  $G_{\text{lower}}$  als jene des Magnetfeldes  $G_{\text{upper}}$  in seinem oberen Abschnitt. Das heißt, dass  $R (= G_{\text{lower}}/G_{\text{upper}})$  dieses Magnetfeldes größer als 1 ist. Unter der Bedingung eines solchen asymmetrischen Magnetfeldes hat die ZGP **90** ein angenähert parabolisches Muster, das nach oben konvex ist. Außerdem ist das Magnetfeld, das in dem oberen und in dem unteren Abschnitt in Bezug auf die ZGP gebildet wird, asymmetrisch verteilt.

**[0039]** Alternativ kann das asymmetrische Magnetfeld  $G$  eine größere Stärke des oberen Magnetfeldes  $G_{\text{upper}}$  als jene des unteren Magnetfeldes  $G_{\text{lower}}$  haben. Das heißt, dass das asymmetrische Magnetfeld  $G$  ein  $R (= G_{\text{lower}}/G_{\text{upper}})$  kleiner als 1 haben kann. Unter der Bedingung eines solchen asymmetrischen Magnetfeldes besitzt die ZGP **90**, obwohl in den Zeichnungen nicht gezeigt, ein angenähert parabolisches Muster, das nach unten konvex ist.

**[0040]** Vorzugsweise legt die Magnetfeld-Anlegeeinheit **80** ein asymmetrisches Magnetfeld  $G$  des CUSP-Typs an den Quarzschmelztiegel **10** an. In diesem Fall umfasst die Magnetfeld-Anlegeeinheit **80** eine ringförmige obere und eine ringförmige untere Spule **80a** bzw. **80b**, die um eine vorgegebene Strecke von einem äußeren Umfang der Isoliereinheit **50** beabstandet sind. Vorzugsweise sind die obere und die untere Spu-

le **80a**, **80b** im Wesentlichen koaxial zu dem Quarzschmelztiegel **10** installiert.

**[0041]** Um das asymmetrische Magnetfeld G zu erzeugen, werden beispielsweise Ströme mit unterschiedlichen Stärken an die obere und die untere Spule **80a**, **80b** angelegt. Das heißt, dass an die untere Spule **80b** ein größerer Strom als an die obere Spule **80a** angelegt wird oder umgekehrt. Alternativ ist es auch möglich, dass ein Strom mit derselben Stärke an die obere und an die untere Spule **80a**, **80b** angelegt wird, dass jedoch die Anzahl der Windungen jeder Spule gesteuert wird, um so ein asymmetrisches Magnetfeld G zu erzeugen. Indessen ist dem Durchschnittsfachmann auf dem Gebiet klar, dass die Stärke des durch die obere und die untere Spule **80a**, **80b** erzeugten Magnetfeldes erhöht werden kann und dabei der R-Wert des asymmetrischen Magnetfeldes G unverändert gehalten werden kann.

**[0042]** Um die Hauptlänge eines unter Verwendung des CZ-Prozesses hergestellten Siliziumeinkristalls zu erhöhen, sollte ein effektiver Segregationskoeffizient des Dotierstoffs erhöht werden. Außerdem sollte für die Erhöhung des effektiven Segregationskoeffizienten die Dicke einer Diffusionsgrenzschicht, die in einer Festkörper/Flüssigkeits-Grenzfläche erzeugt wird, erhöht werden. Um die Dicke der Diffusionsgrenzschicht zu erhöhen, muss die Konvektion der Siliziumschmelze in der Nähe der Festkörper/Flüssigkeits-Grenzfläche stabilisiert werden. Hierzu wird bei der vorliegenden Erfindung wie oben erwähnt ein asymmetrisches Magnetfeld des CUSP-Typs an einen Quarzschmelztiegel angelegt, der eine Schmelze aus Dotierstoff und Silizium enthält. Dann kann die Dicke der Diffusionsgrenzschicht erhöht werden, um den effektiven Segregationskoeffizienten des Dotierstoffs zu erhöhen, ohne eine Codotierung zu verwenden. Daher kann das Profil des spezifischen Widerstandes in Längsrichtung des Einkristalls erweitert werden. Falls das Profil des spezifischen Widerstandes wie oben angegeben erweitert wird, wird die Hauptlänge eines Einkristalls, die die Herstellung eines Produkts ermöglicht, erhöht, wodurch die Produktivität verbessert wird.

**[0043]** Im Allgemeinen wird ein Dotierstoff, der beim Wachstum eines Siliziumeinkristalls eingesetzt wird, in den Einkristall an einer Grenzfläche zwischen der Siliziumschmelze und dem Einkristall eingeleitet. Die Menge des zu diesem Zeitpunkt eingeleiteten Dotierstoffs wird anhand des effektiven Segregationskoeffizienten bestimmt, wobei der effektive Segregationskoeffizient wie in der folgenden Gleichung 1 definiert ist:

Gleichung 1

$$k_e = \frac{C_s}{C_l}$$

**[0044]** Hierbei ist  $C_s$  die Dotierstoffkonzentration in dem Einkristall, während  $C_l$  die Dotierstoffkonzentration in der Siliziumschmelze ist. Außerdem ist eine Gleichung, die den effektiven Segregationskoeffizienten beschreibt, der bis zum momentanen Zeitpunkt induziert wird, durch die folgende Gleichung 2 gegeben. Die Gleichung 2 ist in "Solid State Technology (April 1990 163), R. N. Thomas", in "Japanese Journal of Applied Physics (April 1963, Band 2, Nr. 4) Hiroshi Codera", in "Journal of Crystal Growths (264 (2004) 550-564, D. T. Hurler" usw. offenbart.

Gleichung 2

$$k_e = \frac{k_0}{[k_0 + (1 - k_0) \text{Exp}(-VT/D)]}$$

**[0045]** Hierbei ist  $k_0$  der äquivalente Segregationskoeffizient,  $V$  die Wachstumsgeschwindigkeit des Einkristalls,  $T$  die Dicke einer Diffusionsgrenzschicht und  $D$  ein Diffusionskoeffizient des Fluids. Außerdem ist eine empirische Formel, die die Dicke  $T$  der Diffusionsgrenzschicht beschreibt, durch die folgende Gleichung 3 gegeben:

Gleichung 3

$$T = 1.6 \times D^{1/3} v^{1/6} \omega^{-1/2}$$

**[0046]** Hierbei ist  $v$  der Koeffizient der kinematischen Viskosität, während  $\omega$  die Rotationsfrequenz des Einkristalls ist. Durch Einsetzen von Gleichung 3 in Gleichung 2 wird eine endgültige Gleichung, die durch die folgende Gleichung 4 gegeben ist, erhalten

Gleichung 4

$$k_e = \frac{k_0}{[k_0 + (1 - k_0) \text{Exp}(-1.6 \times VD^{-2/3} v^{1/6} \omega^{-1/2})]}$$

**[0047]** Bei Betrachtung von Gleichung 4 stellt man fest, dass der effektive Segregationskoeffizient zu der Kristallwachstumsgeschwindigkeit und zum Koeffizienten der kinematischen Viskosität proportional ist und zum Diffusionskoeffizienten und zur Kristallrotationsfrequenz umgekehrt proportional ist. Gleichung 4 ist jedoch eine empirische Formel, die auf Ergebnissen basiert, die aus Experimenten erhalten wurden, in denen ein Einkristall von 3 Zoll oder weniger um mehrere Millimeter gewachsen ist, so dass sie nicht auf das Wachstum eines großkalibrigen Einkristalls über 200 mm angewendet werden kann. Der Grund hierfür besteht darin, dass eine Siliziumschmelze in einem anomalen Zustand strömt und daher in komplizierten Mustern bewegt wird, weshalb die Analyse einer genauen Fluidströmung unmöglich ist.

**[0048]** Um bei der vorliegenden Erfindung die geforderte Qualität eines Halbleiterbauelements zu erzielen und um einen effektiven Segregationskoeffizienten ohne Verschlechterung der Produktivität zu verbessern, ist beabsichtigt, den Diffusionskoeffizienten zu senken und die Diffusionsgrenzschicht dicker zu machen. Außerdem wurde es als wirksam erkannt, für die Steuerung des Diffusionskoeffizienten und der Diffusionsgrenzschicht ein asymmetrisches Magnetfeld des CUSP-Typs an den Quarzschmelztiegel anzulegen. Der Grund hierfür besteht darin, dass ein asymmetrisches Magnetfeld des CUSP-Typs eine anomale Strömung von Fluid, die in der Nähe der Festkörper/Flüssigkeits-Grenzfläche der Siliziumschmelze hervorgerufen wird, wirksam begrenzen kann. Eine solche Begrenzung der anomalen Strömung wird erhalten, da das angelegte asymmetrische Magnetfeld eine Konvektionsgeschwindigkeit und eine Temperaturverteilung in der Schmelze stabil steuern kann.

**[0049]** Falls während des Wachstums des Siliziumeinkristalls ein asymmetrisches Magnetfeld angelegt wird, erfüllen das Schmelzegeschwindigkeitsverhältnis ( $Mvr$ ) und die Temperaturdifferenz der Siliziumschmelze, gemessen an einer Schmelzegrenzfläche, die mit dem Siliziumeinkristall in Kontakt ist, bzw. an einer Position, die von der Schmelzegrenzfläche um 50 mm beabstandet ist, die folgenden Gleichungen 5 bzw. 6.

Gleichung 5

$$Mvr \left( \frac{Q'z}{\text{Schnittstelle}} \right) < 30 \text{ (vorzugsweise 15)}$$

Gleichung 6

$$\Delta \text{Temp}_{\text{Schnittstelle}=Q'z} < 50K \text{ (vorzugsweise 30K)}$$

**[0050]**  $Mvr$  in Gleichung 5 ist das Konvektionsgeschwindigkeitsverhältnis einer Siliziumschmelze, das an einer Festkörper/Flüssigkeits-Grenzfläche bzw. an einer Position, die sich 50 mm unterhalb der Festkörper/Flüssigkeits-Grenzfläche befindet, gemessen wird, während  $\Delta \text{Temp}$  in Gleichung 6 eine Temperaturdifferenz der Siliziumschmelze ist, die an einer Festkörper/Flüssigkeits-Grenzfläche bzw. an einer Position, die sich 50 mm unterhalb der Festkörper/Flüssigkeits-Grenzfläche befindet, gemessen wird. Falls  $Mvr$  so gesteuert wird, dass es kleiner als 30 ist und – noch stärker bevorzugt – kleiner als 15 ist, indem ein asymmetrisches Magnetfeld des CUSP-Typs angelegt wird, kann die Dicke der Diffusionsgrenzschicht erhöht werden, um den effektiven Segregationskoeffizienten zu erhöhen. Falls außerdem die Temperaturdifferenz so gesteuert wird, dass sie kleiner als 50 K ist und – noch stärker bevorzugt – kleiner als 30 K ist, indem das asymmetrische Magnetfeld angelegt wird, kann die Dicke der Diffusionsgrenzschicht erhöht werden, um den effektiven Segregationskoeffizienten zu erhöhen.

**[0051]** [Fig. 2](#) zeigt Simulationsergebnisse der ZGP und der Magnetfeldverteilung um eine Siliziumschmelze und einen Quarzschmelztiegel in dem Fall, in dem ein asymmetrisches Magnetfeld des CUSP-Typs an den

Quarzschnmelztiegel angelegt wird, während ein 8-Zoll-Siliziumeinkristall aufwächst.

[0052] Wie in [Fig. 2](#) gezeigt ist, wäre zu vermuten, dass im Fall von R gleich 2,3 (erste Ausführungsform) die Dichte der Magnetfeldverteilung größer als in dem Fall ist, in dem R gleich 1,36 ist (zweite Ausführungsform), dass die ZGP ein nach oben konvexes parabolisches Muster sowohl in der ersten als auch in der zweiten Ausführungsform hat und dass sich die ZGP mit zunehmendem R nach oben bewegt. Die Zunahme von R bedeutet, dass die Magnetfeldstärke der unteren Spule im Vergleich zu jener der oberen Spule relativ erhöht wird. Falls die Stärke des unteren Magnetfeldes der ZGP größer als die Stärke des oberen Magnetfeldes wird, wird die Magnetfeldstärke in der Nähe der Festkörper/Flüssigkeits-Grenzfläche und an einer Grenzfläche zwischen dem Quarzschnmelztiegel und der Siliziumschmelze erhöht. Im Ergebnis wird eine anomale Fluidströmung der Siliziumschmelze insbesondere in der Nähe der Festkörper/Flüssigkeits-Grenzfläche begrenzt. Daher wird die Dicke der Diffusionsgrenzschicht in der Nähe der Festkörper/Flüssigkeits-Grenzfläche erhöht, wodurch der effektive Segregationskoeffizient des Dotierstoffs erhöht wird. Eine solche Erhöhung des effektiven Segregationskoeffizienten wird später unter Verwendung experimenteller Beispiele erläutert.

[0053] [Fig. 3](#) ist ein Graph, der einen theoretischen spezifischen Widerstand (◆) und einen tatsächlich gemessenen spezifischen Widerstand (■) in einer Kristallrichtung eines 8-Zoll-Siliziumeinkristalls zeigt, der hergestellt wird, ohne dass an ihn ein Magnetfeld angelegt wird (Vergleichsbeispiel 1). In [Fig. 3](#) sind Punkte, die die tatsächlich gemessenen spezifischen Widerstände darstellen, gehäuft, da der spezifische Widerstand mehrmals gemessen wurde und dabei ein Messpunkt an einem Kristallabschnitt zu verschiedenen Positionen hin verändert wurde und viele Proben verwendet wurden, um ein Wiederauftreten zu prüfen. Der theoretische spezifische Widerstand in Kristallrichtung wurde durch theoretisches Berechnen eines spezifischen Widerstandes eines Einkristalls unter Verwendung von Faktoren des Kristallradius, des Gewichts des Keimkristalls, des spezifischen Widerstandes des Keimkristalls, einer Charge von polykristallinem Silizium und des effektiven Segregationskoeffizienten erhalten. Ein konkreter theoretischer spezifischer Widerstand kann unter Verwendung der folgenden Gleichungen 7 und 8 berechnet werden.

Gleichung 7

$$\rho_{theory} = \rho_{seed} (1 - S)^{(1 - k_e)}$$

Gleichung 8

$$S = \frac{\pi R^2 H \sigma}{M_{charge} - M_{seed}}$$

[0054] In Gleichung 7 ist  $\rho_{theory}$  der theoretische spezifische Widerstand,  $\rho_{seed}$  der spezifische Widerstand eines Keimkristalls, S das Erstarrungsverhältnis und  $k_e$  der effektive Segregationskoeffizient des Dotierstoffs.

[0055] In Gleichung 8 ist der Radius eines Rohlings, die Höhe eines aufgewachsenen Rohlings,  $\sigma$  die Dichte des Rohlings,  $M_{charge}$  das Gewicht des in den Quarzschnmelztiegel eingegebenen Materials und  $M_{seed}$  das Gewicht des Keimkristalls.

[0056] Bei dem Vergleichsbeispiel 1 sind  $R = 10,35$  cm,  $M_{seed} = 1560$  g,  $\rho_{seed} = 12,417$  cm $\Omega$ ,  $M_{charge} = 120$  kg,  $k_e = 0,750$  und  $\sigma = 2,328$  g/cm $^3$ .

[0057] [Fig. 4](#) ist ein Graph, der einen theoretischen spezifischen Widerstand (◆) und einen tatsächlich gemessenen spezifischen Widerstand (■) in Kristallrichtung eines 8-Zoll-Siliziumeinkristalls zeigt, der hergestellt wird, indem an ihn ein symmetrisches Magnetfeld ( $R = 1$ ) des CUSP-Typs angelegt wird (Vergleichsbeispiel 2). Bei dem Vergleichsbeispiel 2 sind  $R = 10,35$  cm,  $M_{seed} = 1560$  g,  $\rho_{seed} = 11,94$  cm $\Omega$ ,  $M_{charge} = 150$  kg,  $k_e = 0,750$  und  $\sigma = 2,328$  g/cm $^3$ . Ein Magnetfeld wird so angelegt, dass die ZGP rechts unterhalb der Festkörper/Flüssigkeits-Grenzfläche positioniert ist.

[0058] Wie in [Fig. 4](#) gezeigt ist, ist dann, wenn an einen Quarzschnmelztiegel ein symmetrisches Magnetfeld angelegt wird, während ein Siliziumeinkristall aufwächst, der tatsächlich gemessene spezifische Widerstand im Wesentlichen gleich dem theoretischen spezifischen Widerstand. Daher wird vermutet, dass das symmet-

rische Magnetfeld den effektiven Segregationskoeffizienten nicht wesentlich erhöhen kann, weshalb das Profil des spezifischen Widerstandes in Längsrichtung des Kristalls nicht gesteuert werden kann.

**[0059]** [Fig. 5](#) ist ein Graph, der den theoretischen spezifischen Widerstand (◆) und den tatsächlich gemessenen spezifischen Widerstand (■) eines Siliziumeinkristalls in Kristallrichtung zeigt, der hergestellt wird, indem an ihn ein asymmetrisches Magnetfeld ( $R = 2,3$ ) angelegt wird, das in Übereinstimmung mit einer ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wie in (a) von [Fig. 2](#) gezeigt gebildet wird. Bei der ersten Ausführungsform sind  $R = 10,35$  cm,  $M_{\text{seed}} = 1560$  g,  $\rho_{\text{seed}} = 11,25$  cm $\Omega$ ,  $M_{\text{charge}} = 150$  kg,  $k_e = 0,750$  und  $\sigma = 2,328$  g/cm $^3$ .

**[0060]** In [Fig. 5](#), anders als bei den Vergleichsergebnissen des spezifischen Widerstandes der oben erläuterten Vergleichsbeispiele 1 und 2 erkennt man, dass die Verringerung des spezifischen Widerstandes entsprechend dem Kristallwachstum abnimmt, so dass das Profil des spezifischen Widerstandes in Längsrichtung des Kristalls erweitert wird. Genauer gesagt wird in einem Bereich von 0 bis  $1/2$  L (wobei L die Gesamtlänge des aufgewachsenen Einkristallkörpers ist) in Längsrichtung des Kristalls der spezifische Widerstand um 0 bis 15 % gegenüber einem theoretischen spezifischen Widerstand erhöht, außerdem wird in einem Bereich von  $1/2$  L bis  $1$  L der spezifische Widerstand um 0 bis 40 % gegenüber dem theoretischen spezifischen Widerstand erhöht. Daraus geht hervor, dass durch Anlegen eines asymmetrischen Magnetfeldes der effektive Segregationskoeffizient des Dotierstoffs gesteuert werden kann und dass außerdem das Profil des spezifischen Widerstandes in Längsrichtung des Kristalls gesteuert werden kann, weshalb die Hauptlänge des Siliziumeinkristalls erhöht werden kann.

**[0061]** Obwohl durch die spezifischen Beispiele nicht nahegelegt, ist klar, dass ein effektiver Segregationskoeffizient weiter erhöht werden könnte, wenn Magnetstärken der oberen und der unteren Spule im gleichen Verhältnis erhöht werden obwohl R gleich bleibt, da die Magnetfelddichte in der Siliziumschmelze erhöht wird.

**[0062]** [Fig. 6](#) ist ein Graph, der einen theoretischen spezifischen Widerstand (◆) und einen tatsächlich gemessenen spezifischen Widerstand (■) in Kristallrichtung eines 8-Zoll-Siliziumeinkristalls zeigt, der hergestellt wird, indem an ihn ein asymmetrisches Magnetfeld ( $R = 1,36$ ) angelegt wird, das in Übereinstimmung mit einer zweiten Ausführungsform der Erfindung – wie in (b) von [Fig. 2](#) gezeigt – beschaffen ist. Bei der zweiten Ausführungsform sind  $R = 10,35$  cm,  $M_{\text{seed}} = 1560$  g,  $\rho_{\text{seed}} = 11,33$  cm $\Omega$ ,  $M_{\text{charge}} = 150$  kg,  $k_e = 0,750$  und  $\sigma = 2,328$  g/cm $^3$ . Außerdem wird ein asymmetrisches Magnetfeld in der Weise angelegt, dass sich ein konvexer Punkt der ZGP direkt unter der Festkörper/Flüssigkeits-Grenzfläche befindet.

**[0063]** Wie bei Betrachtung von [Fig. 6](#) festgestellt wird, wird das Profil des spezifischen Widerstandes in Längsrichtung des Kristalls ähnlich wie in der ersten Ausführungsform erweitert. Genauer gesagt, wurde beobachtet, dass in einem Bereich von 0 bis  $1/2$  L in Längsrichtung des Kristalls der spezifische Widerstand um 0 bis 10 % gegenüber dem theoretischen spezifischen Widerstand erhöht wurde und dass in einem Bereich von  $1/2$  L bis  $1$  L der spezifische Widerstand um 0 bis 23 % gegenüber dem theoretischen spezifischen Widerstand erhöht wurde.

**[0064]** Außerdem ergibt der Vergleich der ersten Ausführungsform mit der zweiten Ausführungsform trotz der Verwendung eines asymmetrischen Magnetfeldes, dass es für die Steuerung des spezifischen Widerstandes in Längsrichtung des Kristalls vorteilhafter ist, wenn die ZGP über der Siliziumschmelze (erste Ausführungsform) positioniert ist als wenn durch Steuerung von R der Wert von R erhöht wird und somit die ZGP in der Siliziumschmelze positioniert ist (zweite Ausführungsform).

**[0065]** [Fig. 7](#) ist ein Graph, der Simulationsergebnisse der Temperaturverteilung einer Siliziumschmelze bei der ersten bzw. bei der zweiten Ausführungsform, die in [Fig. 2](#) gezeigt sind, zeigt. In [Fig. 7](#) ist eine durchgezogene Linie eine Isothermenlinie, wobei ein Abstand zwischen benachbarten Isothermen 2 K beträgt. Wie in [Fig. 7](#) gezeigt ist, ist ein Isothermen-Abstand bei der ersten Ausführungsform größer als ein Isothermen-Abstand bei der zweiten Ausführungsform in der Nähe der Festkörper/Flüssigkeits-Grenzfläche. Somit ist klar, dass eine Zunahme von R einen Temperaturgradienten in der Siliziumschmelze verringern würde, wodurch die Temperaturverteilung stabilisiert wird. Aus den in [Fig. 5](#) und [Fig. 6](#) gezeigten Graphen ergibt sich, dass bei einer Zunahme von R das Profil des spezifischen Widerstandes in einer Längsrichtung des Kristalls erweitert wird, so dass der effektive Segregationskoeffizient des Dotierstoffs besser gesteuert werden kann, da der Temperaturgradient in der Siliziumschmelze verringert ist. Weiterhin wird in dem Fall, in dem R erhöht wird, so dass sich die ZGP oberhalb der Siliziumschmelze befindet (erste Ausführungsform), der Temperaturgradient in der Siliziumschmelze verringert, um eine stabile Steuerung der Temperaturverteilung zu erlauben, verglichen mit dem Fall, in dem sich die ZGP in der Siliziumschmelze befindet (zweite Ausführungsform). Falls die Tempera-

turverteilung wie oben erwähnt stabilisiert ist, ist es möglich, eine anomale Fluidströmung der Siliziumschmelze zu begrenzen, wodurch ermöglicht wird, die Dicke der Diffusionsgrenzschicht in der Nähe der Festkörper/Flüssigkeits-Grenzfläche zu erhöhen und folglich den effektiven Segregationskoeffizienten zu erhöhen.

**[0066]** **Fig. 8** ist eine Darstellung, die Simulationsergebnisse der Konvektionsgeschwindigkeitsverteilung für die Siliziumschmelze in den in **Fig. 2** gezeigten ersten und zweiten Ausführungsformen zeigt. In **Fig. 8** gibt eine Pfeilrichtung eine Konvektionsrichtung der Siliziumschmelze an, wobei die Länge des Pfeils die Größe der Konvektionsgeschwindigkeit angibt. In **Fig. 8** ist zu erkennen, dass auf der Basis desselben Punkts eine Konvektionsgeschwindigkeit mit zunehmendem R verringert wird und dass die Konvektionsgeschwindigkeit der Siliziumschmelze in dem Fall, in dem die ZGP über der Siliziumschmelze positioniert ist (erste Ausführungsform), stärker verringert wird als in dem Fall, in dem sich die ZGP in der Siliziumschmelze befindet (zweite Ausführungsform). Genauer beträgt die Schmelzekonvektionsgeschwindigkeit an einer Festkörper/Flüssigkeits-Grenzfläche (A-Punkt) 0,14 cm/s und an einem Krümmungspunkt (B-Punkt) des Bodens der Seitenwand 1,21 cm/s, während bei der zweiten Ausführungsform die Schmelzekonvektionsgeschwindigkeit an der Festkörper/Flüssigkeits-Grenzfläche (A-Punkt) 0,33 cm/s beträgt und an einem gekrümmten Punkt (B-Punkt) des Bodens der Seitenwand 1,85 cm/s beträgt.

**[0067]** Gemäß der Darstellung von **Fig. 8** wird bei einer Erhöhung von R und einer Bewegung der ZGP nach oben die Konvektionsgeschwindigkeit der Siliziumschmelze verringert, um eine anomale Strömung der Siliziumschmelze zu begrenzen, weshalb die Dicke der Diffusionsgrenzschicht in der Nähe der Festkörper/Flüssigkeits-Grenzfläche erhöht wird, um den effektiven Segregationskoeffizienten des Dotierstoffs zu erhöhen.

**[0068]** Wie oben erwähnt, ist es durch Anlegen eines asymmetrischen Magnetfeldes während des Aufwachsens eines Siliziumeinkristalls unter Verwendung des CZ-Prozesses möglich, die Siliziumkonvektionsgeschwindigkeit und den Temperaturgradienten in der Siliziumschmelze zu verringern und somit eine anomale Strömung der Siliziumschmelze zu begrenzen, so dass die Dicke der Diffusionsgrenzschicht in der Nähe der Festkörper/Flüssigkeits-Grenzfläche so gesteuert werden kann, dass der effektive Segregationskoeffizient des Dotierstoffs erhöht wird, wodurch ein Profil des spezifischen Widerstandes in Längsrichtung des Kristalls erweitert werden kann.

**[0069]** Die Erweiterung des Profils des spezifischen Widerstandes steht in einer Beziehung zur Steuerung der Dicke der Diffusionsgrenzschicht, die sich aus der Steuerung der Konvektionsgeschwindigkeit und der Temperaturverteilung der Siliziumschmelze ergibt, so dass das Profil des spezifischen Widerstandes durch eine zusätzliche Steuerung der Rotationsgeschwindigkeit des Kristalls, der Strömungsrate eines einem oberen Abschnitt der Siliziumschmelze längs einer Seitenwand des Kristalls zugeführten Inertgases, des Drucks in einer Einkristall-Wachstumschamber und dergleichen zusammen mit dem Anlegen eines asymmetrischen Magnetfeldes an den Quarzschmelztiegel weiter erweitert werden kann.

**[0070]** Die erste Ausführungsform und die zweite Ausführungsform, die oben erläutert worden sind, basieren auf dem Fall, bei dem R des asymmetrischen Magnetfeldes des CUSP-Typs, das an den Quarzschmelztiegel angelegt wird, größer als 1 ist, es ist jedoch klar, dass die vorliegende Erfindung nicht auf diesen Fall begrenzt ist, sondern auch auf den Fall angewendet werden kann, in dem R größer als 0 und kleiner als 1 ist.

**[0071]** Außerdem ist die vorliegende Erfindung nicht auf die Art von Materialien begrenzt, die unter Verwendung des CZ-Prozesses aufwachsen, sondern kann auf alle Arten des Einkristallwachstums angewendet werden. Somit kann die vorliegende Erfindung auf das Wachstum aller Arten von einzelnen Elementen wie etwa Germanium und auf alle Arten von Einkristallen von Verbindungshalbleitern einschließlich Si-, Ge-, GaAs-, InP-, LN(LiNbO<sub>3</sub>)-, LT(LiTaO<sub>3</sub>)-, YAG(Yttrium-Aluminium-Granat)-, LBO(LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>)- und CLBO(CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub>)-Einkristallrohlinge und auf Siliziumeinkristalle angewendet werden.

**[0072]** Die vorliegende Erfindung ist im Einzelnen beschrieben worden. Es sollte jedoch klar sein, dass die genaue Beschreibung besonderer Beispiele, die bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung angeben, lediglich zur Erläuterung gegeben worden ist, da verschiedene Änderungen und Abwandlungen innerhalb des Erfindungsgedankens und des Umfangs der Erfindung für den Fachmann auf dem Gebiet anhand dieser genauen Beschreibung offensichtlich sind.

#### INDUSTRIELLE ANWENDBARKEIT

**[0073]** Gemäß der vorliegenden Erfindung wird ein asymmetrisches Magnetfeld angelegt, wenn ein Halbleitereinkristall unter Verwendung des CZ-Prozesses aufwächst, wodurch die Konvektionsgeschwindigkeit und

die Temperaturverteilung der Halbleiterschmelze gesteuert werden und somit eine anomale Strömung der Halbleiterschmelze begrenzt wird. Dadurch wird die Dicke der Diffusionsgrenzschicht in der Nähe der Festkörper/Flüssigkeits-Grenzfläche erhöht, um einen effektiven Segregationskoeffizienten eines Dotierstoffs zu erhöhen, so dass ein Profil des spezifischen Widerstandes in Längsrichtung des Kristalls während des Wachstums nicht nur bei einem klein- oder mittelkalibrigen Halbleitereinkristall, sondern auch bei einem großkalibrigen Halbleitereinkristall über 200 mm erweitert wird. Somit kann die vorliegende Erfindung die Produktivität gegenüber der herkömmlichen Produktivität verbessern.

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Herstellen eines Halbleitereinkristalls unter Verwendung eines Czochralski-Prozesses (CZ-Prozesses), bei dem ein Keimkristall in eine Schmelze aus Halbleiterrohmaterial und Dotierstoff, die in einem Schmelztiigel aufgenommen sind, getaucht wird, woraufhin der Keimkristall langsam nach oben gezogen und dabei gedreht wird, um einen Halbleitereinkristall wachsen zu lassen, wobei ein asymmetrisches Magnetfeld des CUPS-Typs, das eine in Bezug auf die ZGP (Null-Gauß-Ebene) obere Magnetfeldstärke und eine untere Magnetfeldstärke hat, die voneinander verschieden sind, wobei die vertikale Komponente des Magnetfelds 0 ist, an den Schmelztiigel angelegt wird, so dass das Profil des spezifischen Widerstandes, das in Längsrichtung des Kristalls theoretisch berechnet wird, in Längsrichtung des Kristalls erweitert wird.

2. Verfahren zum Herstellen eines Halbleitereinkristalls nach Anspruch 1, bei dem der theoretisch berechnete spezifische Widerstand unter Verwendung der folgenden Gleichung berechnet wird:

$$\rho_{theory} = \rho_{seed} (1 - S)^{(1 - k_e)}$$

wobei

$\rho_{theory}$  der theoretische spezifische Widerstand,

$\rho_{seed}$  der spezifische Widerstand des Keimkristalls,

S das Erstarrungsverhältnis und

$k_e$  der effektive Segregationskoeffizient des Dotierstoffs ist.

3. Verfahren zum Herstellen eines Halbleitereinkristalls nach Anspruch 1, bei dem während des Wachstums des Einkristalls die Temperaturdifferenz zwischen der Festkörper/Flüssigkeits-Grenzfläche und einem Punkt, der von der Festkörper/Flüssigkeits-Grenzfläche um 50 mm beabstandet ist, kleiner als 50 K ist.

4. Verfahren zum Herstellen eines Halbleitereinkristalls nach Anspruch 1, bei dem während des Wachstums des Einkristalls das Verhältnis der Konvektionsgeschwindigkeit an der Festkörper/Flüssigkeits-Grenzfläche zu der Konvektionsgeschwindigkeit an einem Punkt, der von der Festkörper/Flüssigkeits-Grenzfläche um 50 mm beabstandet ist, kleiner als 30 ist.

5. Verfahren zum Herstellen eines Halbleitereinkristalls nach Anspruch 1, bei dem der spezifische Widerstand, der in einem Bereich von 0 bis 1/2 L in Längsrichtung des aufgewachsenen Halbleitereinkristalls gemessen wird, gegenüber dem theoretisch berechneten spezifischen Widerstand um 0 bis 15 % erhöht wird.

6. Verfahren zum Herstellen eines Halbleitereinkristalls nach Anspruch 1, bei dem der spezifische Widerstand, der in einem Bereich von 1/2 L bis 1 L in Längsrichtung des aufgewachsenen Halbleitereinkristalls gemessen wird, gegenüber dem theoretisch berechneten spezifischen Widerstand um 0 bis 40 % erhöht wird.

7. Verfahren zum Herstellen eines Halbleitereinkristalls nach Anspruch 1, bei dem in Bezug auf die ZGP ein unterer Abschnitt des asymmetrischen Magnetfelds eine größere Stärke als ein oberer Abschnitt des asymmetrischen Magnetfelds hat.

8. Verfahren zum Herstellen eines Halbleitereinkristalls nach Anspruch 7, bei dem die ZGP ein nach oben konvexes parabolisches Muster hat und bei dem ein oberer Scheitelpunkt des parabolischen Musters oberhalb einer Halbleiterschmelze positioniert ist.

9. Verfahren zum Herstellen eines Halbleitereinkristalls nach Anspruch 1, bei dem in Bezug auf die ZGP ein oberer Abschnitt des asymmetrischen Magnetfeldes eine größere Stärke als ein unterer Abschnitt des asymmetrischen Magnetfelds hat.

10. Verfahren zum Herstellen eines Halbleitereinkristalls nach Anspruch 9, bei dem die ZGP ein nach unten konvexes parabolisches Muster hat und bei dem ein unterer Scheitelpunkt des parabolischen Musters in einer Halbleiterschmelze positioniert ist.

11. Verfahren zum Herstellen eines Halbleitereinkristalls nach einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei der Halbleitereinkristall ein Si-, Ge-, GaAs-, InP-, LN(LiNbO<sub>3</sub>)-, ein LT(LiTaO<sub>3</sub>)-, ein YAG(Yttrium-Aluminium-Granat)-, ein LBO(LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>)- oder ein CLBO(CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub>)-Einkristall ist.

12. Rohling eines Halbleitereinkristalls, der unter Verwendung eines CZ-Prozesses aufgewachsen ist, indem ein Keimkristall in eine Schmelze aus Halbleiterrohmaterial und Dotierstoff, die in einem Schmelztiigel aufgenommen sind, eingetaucht wird und daraufhin der Keimkristall langsam nach oben gezogen und dabei gedreht wird, wobei während des Wachstums des Halbleitereinkristalls ein asymmetrisches Magnetfeld des CUSP-Typs mit einer in Bezug auf die ZGP oberen und unteren Magnetfeldstärke, die voneinander verschieden sind, wobei die vertikale Komponente des Magnetfeldes 0 ist, an den Schmelztiigel angelegt wird, so dass ein Profil des spezifischen Widerstandes, das in Längsrichtung des Kristalls theoretisch berechnet wird, in Längsrichtung des Kristalls erweitert wird.

13. Rohling eines Halbleitereinkristalls nach Anspruch 12, bei dem der theoretisch berechnete spezifische Widerstand unter Verwendung der folgenden Gleichung berechnet wird:

$$\rho_{theory} = \rho_{seed} (1 - S)^{(1 - k_e)}$$

wobei

$\rho_{theory}$  der theoretische spezifische Widerstand,

$\rho_{seed}$  der spezifische Widerstand des Keimkristalls,

S das Erstarrungsverhältnis und

$k_e$  der effektive Segregationskoeffizient des Dotierstoffs ist.

14. Rohling eines Halbleitereinkristalls nach Anspruch 12, wobei der Halbleitereinkristall durch Anlegen eines asymmetrischen Magnetfeldes hergestellt wird, dessen in Bezug auf die ZGP unterer Abschnitt eine größere Stärke als ein oberer Abschnitt des asymmetrischen Magnetfelds hat.

15. Rohling eines Halbleitereinkristalls nach Anspruch 14, wobei die ZGP ein nach oben konvexes parabolisches Muster hat und wobei ein oberer Scheitelpunkt des parabolischen Musters oberhalb der Halbleiterschmelze positioniert ist.

16. Rohling eines Halbleitereinkristalls nach Anspruch 12, wobei der Halbleitereinkristall unter Verwendung eines asymmetrischen Magnetfeldes hergestellt wird, dessen oberer Abschnitt in Bezug auf die ZGP eine größere Stärke als der untere Abschnitt des asymmetrischen Magnetfelds hat.

17. Rohling eines Halbleitereinkristalls nach Anspruch 16, wobei die ZGP ein nach unten konvexes parabolisches Muster hat und wobei ein unterer Scheitelpunkt des parabolischen Musters in einer Halbleiterschmelze positioniert ist.

18. Rohling eines Halbleitereinkristalls nach Anspruch 12, wobei ein spezifischer Widerstand, der in einem Bereich von 0 bis 1/2 L in Längsrichtung des aufgewachsenen Halbleitereinkristalls gemessen wird, um gegenüber dem theoretisch berechneten spezifischen Widerstands 0 bis 15 % erhöht ist.

19. Rohling eines Halbleitereinkristalls nach Anspruch 12, wobei ein spezifischer Widerstand, der im Bereich von 1/2 L bis 1 L in Längsrichtung des aufgewachsenen Halbleitereinkristalls gemessen wird, um gegenüber dem theoretisch berechneten spezifischen Widerstand 0 bis 40 % erhöht ist.

20. Rohling eines Halbleitereinkristalls nach einem der Ansprüche 12 bis 19, wobei der Halbleitereinkristallrohling ein Si-, Ge-, GaAs-, InP-, LN(LiNbO<sub>3</sub>)-, ein LT(LiTaO<sub>3</sub>)-, ein YAG(Yttrium-Aluminium-Granat)-, ein LBO(LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>)- oder ein CLBO(CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub>)-Einkristallrohling ist.

21. Halbleiterwafer, der unter Verwendung des Halbleitereinkristallrohlings nach einem der Ansprüche 12 bis 19 hergestellt wird.

22. Halbleiterwafer nach Anspruch 21, wobei der Halbleitereinkristallrohling ein Si-, Ge-, GaAs-, InP-, LN(LiNbO<sub>3</sub>)-, ein LT(LiTaO<sub>3</sub>)-, ein YAG(Yttrium-Aluminium-Granat)-, ein LBO(LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>)- oder ein CLBO(CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub>)-Einkristallrohling ist.

Es folgen 5 Blatt Zeichnungen

FIG. 1

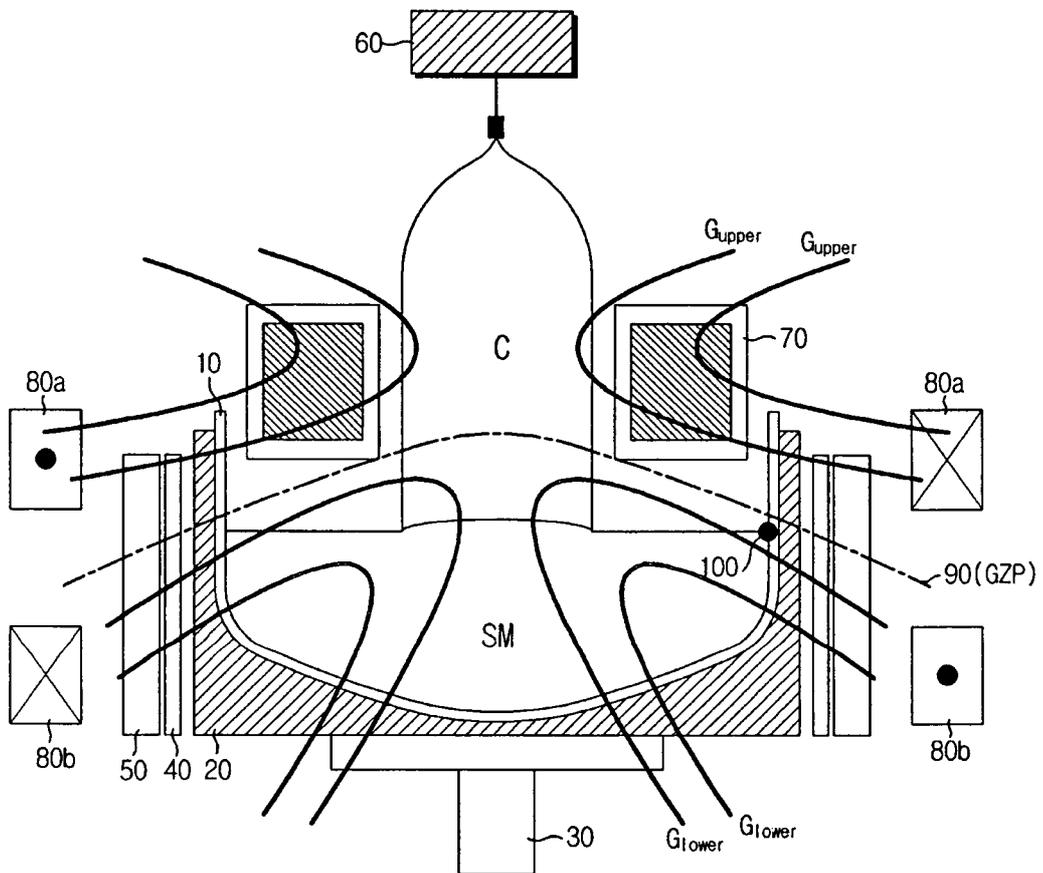
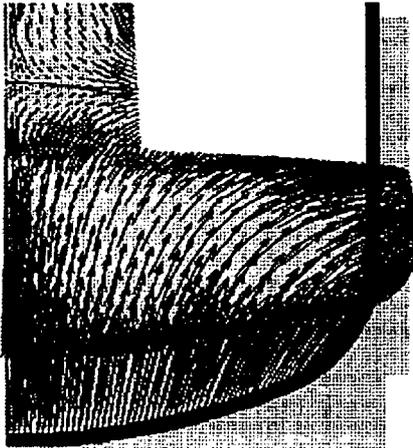
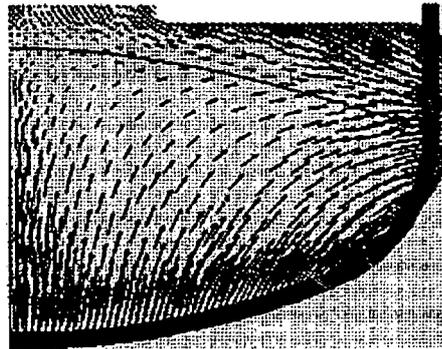


FIG. 2



(a) Ausführungform 1 (R=2,3)



(b) Ausführungform 2 (R=1,36)

FIG. 3

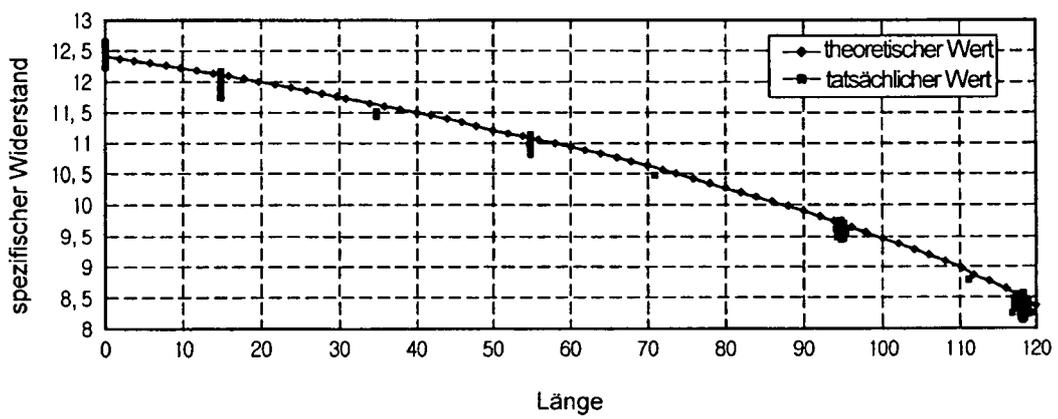


FIG. 4

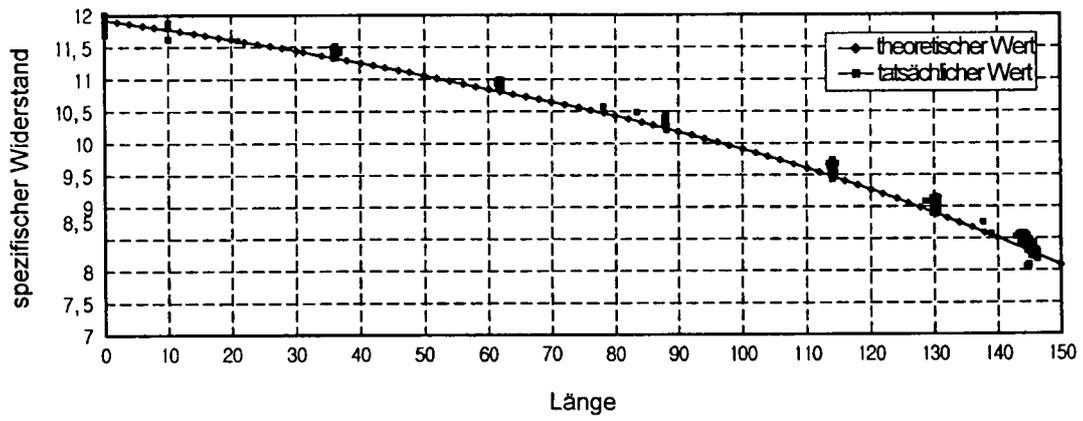


FIG. 5

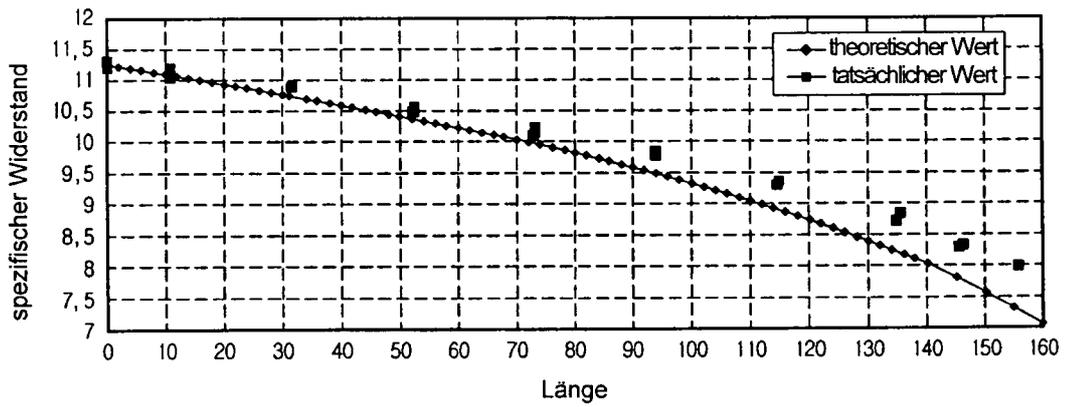


FIG. 6

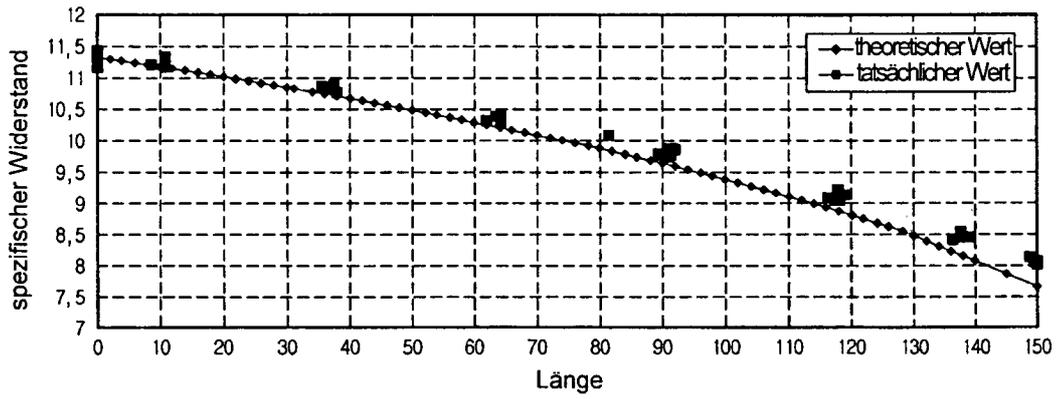
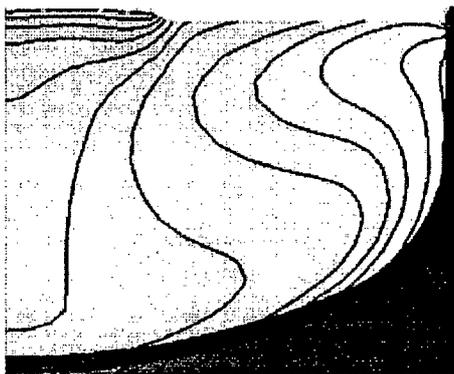
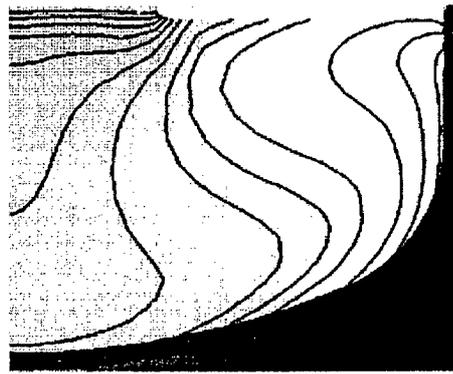


FIG. 7

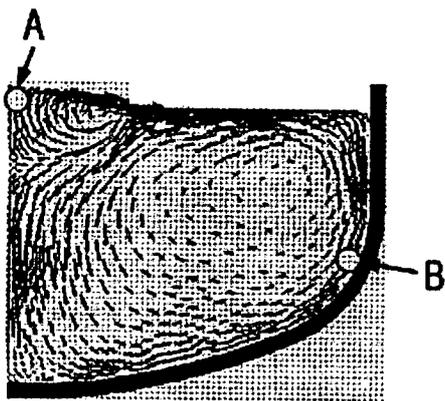


(a) Ausführungsform 1

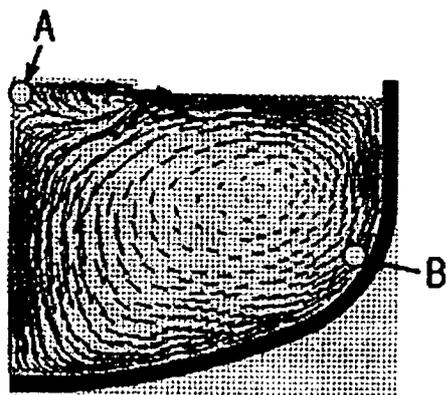


(b) Ausführungsform 2

FIG. 8



(a) Ausführungsform 1



(b) Ausführungsform 2