

**Verfahren zur Herstellung einer Halbleiterscheibe aus einkristallinem Silizium,
Vorrichtung zur Herstellung einer Halbleiterscheibe aus einkristallinem Silizium
und Halbleiterscheibe aus einkristallinem Silizium**

5

Gegenstand der Erfindung ist ein Verfahren zur Herstellung einer Halbleiterscheibe aus einkristallinem Silizium, die Sauerstoff und mindestens einen Dotierstoff vom n-Typ enthält, wobei die Sauerstoff-Konzentration und die radiale Variation der Sauerstoff-Konzentration vergleichsweise gering sind. Gegenstand der Erfindung ist auch eine Vorrichtung, die zur Herstellung der Halbleiterscheibe geeignet ist und ferner auch eine Halbleiterscheibe mit den oben genannten Eigenschaften, die einen Durchmesser von mindestens 300 mm hat.

10

Stand der Technik / Probleme

15

Eine Halbleiterscheibe aus einkristallinem Silizium mit den oben genannten Eigenschaften stellt ein Substrat dar, das insbesondere verwendet wird, um elektronische Bauelemente auf der Basis von bipolaren Transistoren mit isoliertem Gate, IGBTs, herzustellen. Die Sauerstoff-Konzentration des Substrats muss möglichst niedrig sein, weil im Zuge der Herstellung von elektronischen Bauelementen thermische Donatoren unter Mitwirkung des Sauerstoffs gebildet werden, die den elektrischen Widerstand zum Nachteil der Funktionstüchtigkeit der Bauelemente verändern können. Das Erfordernis, dass die Sauerstoff-Konzentration des Substrats vergleichsweise gering sein muss, stellt eine Herausforderung dar, insbesondere, wenn gleichzeitig erwartet wird, dass der Durchmesser der Halbleiterscheibe mindestens 300 mm betragen soll.

20

25

Unter solchen Umständen muss der Einkristall, von dem die Halbleiterscheibe abgetrennt wird, gemäß der CZ-Methode gezüchtet werden. Das Züchten eines Einkristalls aus Silizium gemäß der CZ-Methode umfasst das Schmelzen von polykristallinem Silizium in einem Quarz-Tiegel, das Eintauchen eines Keimkristalls in die entstandene Schmelze und das Ziehen des Keimkristalls nach oben, wobei an der Unterseite des Keimkristalls Material zu kristallisieren beginnt, während der Quarz-Tiegel und der Keimkristall gedreht werden. Ein Teil dieses Materials wird zu einem

30

Einkristall aus Silizium, von dem in der Regel einkristalline Halbleiterscheiben aus Silizium abgetrennt werden.

Die Schmelze aus Silizium löst Sauerstoff aus dem Tiegelmateriale, der teilweise in den wachsenden Einkristall eingebaut wird und teilweise aus der Schmelze in Form von gasförmigen SiO entweicht. Es sind besondere Maßnahmen notwendig, um zu erreichen, dass die Sauerstoff-Konzentration im Einkristall ausreichend niedrig bleibt, damit sich das einkristalline Material zur Herstellung von IGBTs eignet.

Andererseits stärkt die Anwesenheit von Sauerstoff im Kristallgitter die Widerstandsfähigkeit der Halbleiterscheibe aus einkristallinem Silizium gegen Vergleitungen (slip) durch thermisch oder mechanisch hervorgerufene Spannungen. Ist die Sauerstoff-Konzentration im Einkristall vergleichsweise niedrig, besteht das Problem, dass Halbleiterscheiben aus einkristallinem Silizium, die von einem solchen Einkristall abgetrennt werden, einen Abfall der Sauerstoff-Konzentration im Randbereich aufweisen und der Randbereich besonders anfällig für das Entstehen von Vergleitungen ist.

Bei Dotierung der Schmelze mit Dotierstoff vom n-Typ, beispielsweise mit Phosphor, reichert sich der Dotierstoff mit zunehmender Kristallisation des Einkristalls in der Schmelze an. Wegen dieses Segregationseffekts sinkt der spezifische Widerstand im Einkristall in Richtung zum unteren Ende des Einkristalls hin. Halbleiterscheiben, die vom Einkristall abgetrennt werden und als Substrate zur Herstellung von IGBTs in geeignet sollen, dürfen sich bezüglich ihrer elektrischen Eigenschaften kaum unterscheiden. Um entgegenzuwirken, dass der spezifische Widerstand über die Länge des Einkristalls abnimmt, kann der Schmelze Dotierstoff vom p-Typ, beispielsweise Bor, hinzugefügt werden, um die segregationsbedingte Zunahme an Ladungsträgern zu kompensieren. Diese Maßnahme wird Gegendotieren genannt und beispielsweise in US2015/0 349 066 A1 ausführlich beschrieben.

US2007/0 193 501 A1 beschreibt die Herstellung einer Halbleiterscheibe aus einkristallinem Silizium mit einer Sauerstoff-Konzentration von nicht mehr als $4,33 \times 10^{17}$ Atome/cm³, wobei der angegebene Wert auf new ASTM umgerechnet wurde. In

dem Dokument enthaltene Beispiele zeigen, dass Halbleiterscheiben mit einer Konzentration von umgerechnet $2,6 \times 10^{17}$ Atome/cm³ tatsächlich hergestellt wurden. Das im Dokument beschriebene Herstellungsverfahren umfasst die Züchtung eines Einkristalls aus Silizium gemäß der CZ-Methode, wobei zur Steigerung der Ausbeute gegendotiert wird.

EP 0 926 270 A1 offenbart eine ringförmige Heizvorrichtung, deren Verwendung das Entweichen von SiO über die Oberfläche der Schmelze begünstigt.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es aufzuzeigen, wie n-Typ dotierte Halbleiterscheiben aus einkristallinem Silizium mit noch niedrigeren Sauerstoff-Konzentrationen zur Verfügung gestellt werden können, insbesondere solche, bei denen die radiale Variation der Sauerstoff-Konzentration reduziert ist, und wie die Ausbeute an solchen Halbleiterscheiben optimiert werden kann.

Die Aufgabe der Erfindung wird gelöst durch ein Verfahren zur Herstellung einer Halbleiterscheibe aus einkristallinem Silizium, die Sauerstoff und mindestens einen Dotierstoff vom n-Typ enthält, umfassend

- das Bereitstellen einer Schmelze aus Silizium, die Dotierstoff vom n-Typ enthält, in einem Quarz-Tiegel, wobei die Schmelze eine anfängliche Höhe hM hat;
- das Erhitzen der Schmelze von der Seite durch selektives Zuführen von Wärme zu einem oberen Volumen der Schmelze, das eine anfängliche Höhe hm hat, wobei die Höhe hm kleiner ist als die Höhe hM;
- das Ziehen eines Einkristalls aus Silizium gemäß der CZ-Methode aus der Schmelze mit einer Ziehgeschwindigkeit V;
- das Erhitzen der Schmelze von oben im Bereich einer Phasengrenze zwischen dem wachsenden Einkristall und der Schmelze;
- das Erhitzen der Schmelze von oben im Bereich einer Oberfläche der Schmelze;
- das Beaufschlagen der Schmelze mit einem Magnetfeld;
- das Gegendotieren der Schmelze mit Dotierstoff vom p-Typ; und
- das Abtrennen der Halbleiterscheibe aus einkristallinem Silizium vom Einkristall.

Gegenstand der Erfindung ist des Weiteren eine Halbleiterscheibe aus einkristallinem Silizium, die Sauerstoff, thermische Donatoren und mindestens einen Dotierstoff vom

n-Typ enthält und einen Durchmesser von nicht weniger als 300 mm hat. Die Sauerstoff-Konzentration der Halbleiterscheibe ist kleiner als $2,2 \times 10^{17}$ Atome/cm³, vorzugsweise kleiner als $2,0 \times 10^{17}$ Atome/cm³, und weicht in radialer Richtung von einem Mittelwert um nicht mehr als 5 % ab. Die Dichte an thermischen Donatoren in der Halbleiterscheibe ist nicht mehr als 3×10^{13} /cm³.

Vorzugsweise beträgt die Abweichung der Sauerstoff-Konzentration von einem Mittelwert in einem Randbereich umfassend die radialen Positionen von 130 mm bis 150 mm nicht mehr als 10 %.

10

Die Erfinder haben festgestellt, dass eine Reihe von Maßnahmen getroffen werden müssen, um die Aufgabe zu lösen. Es werden Strömungsverhältnisse und ein Temperaturfeld in der Schmelze erzeugt, die das Lösen von Sauerstoff aus dem Tiegelmateriale behindern und das Entweichen von SiO aus der Schmelze über die Oberfläche der Schmelze fördern, und die begünstigen, dass Sauerstoff im wachsenden Einkristall vom Zentrum bis zum Rand des Einkristalls homogen verteilt aufgenommen wird. Darüber hinaus werden beim Ziehen des Einkristalls die Ziehgeschwindigkeit und die Abkühlrate des Einkristalls kontrolliert, um die Konzentration an thermischen Donatoren im Einkristall gering zu halten.

20

Die Schmelze aus Silizium, die Dotierstoff vom n-Typ enthält, wird vorzugsweise bereitgestellt, indem polykristallines Silizium und Dotierstoff vom n-Typ, beispielsweise Phosphor, in einem Quarz-Tiegel geschmolzen werden.

Während des Ziehens eines Einkristalls wird der Schmelze von mindestens drei Stellen Wärme zugeführt. Von oben im Bereich der Phasengrenze zwischen dem wachsenden Einkristall und der Schmelze, von oben im Bereich der Oberfläche der Schmelze und selektiv von der Seite zur oberen Hälfte der Schmelze. Darüber hinaus kann die Schmelze zusätzlich auch von unten erhitzt werden, beispielsweise um unter Beibehaltung der Gesamtheizleistung für eine Entlastung der Heizleistung an mindestens einer der mindestens drei Stellen zu sorgen. Beispielsweise kann es vorteilhaft sein, die Wärmezufuhr von der Seite zu verringern, um den Quarz-Tiegel zu schonen und um entgegenzuwirken, dass der obere Teil der Tiegelwand seine Form verliert und zur Schmelze kippt.

35

- Die Wärmezufuhr zur Schmelze erfolgt vorzugsweise derart, dass das Verhältnis von der Heizleistung zur Gesamtheizleistung im Fall des Erhitzens der Schmelze von oben im Bereich der Phasengrenze nicht weniger als 5 % und nicht mehr als 15 % beträgt und im Fall des Erhitzens der Schmelze von oben im Bereich der Oberfläche nicht weniger als 5 % und nicht mehr als 15 % beträgt. Falls die Schmelze zusätzlich von unten erhitzt wird beträgt das Verhältnis der dafür aufgewendeten Heizleistung zur Heizleistung, die aufgewendet wird, um die Schmelze von der Seite zu erhitzen vorzugsweise nicht mehr als 5 %.
- Die Wärmezufuhr von der Seite muss selektiv zu einem oberen Anteil des Volumens der Schmelze gerichtet sein. Mit anderen Worten, ein beabsichtigtes Erhitzen von der Seite eines unteren Anteils des Volumens der Schmelze findet am Anfang der Kristallzucht nicht statt und vorzugsweise solange nicht, bis 70 % des anfänglichen Volumens der Schmelze Bestandteil des Einkristalls geworden sind. Andernfalls können die gewünschten Strömungsverhältnisse und das gewünschte Temperaturfeld in der Schmelze nicht erzeugt werden. Dementsprechend umfasst das Verfahren das selektive Zuführen von Wärme zu einem oberen Volumen der Schmelze, das eine anfängliche Höhe h_m hat, wobei die Höhe h_m kleiner ist als die anfängliche Höhe h_M der Schmelze. Das Verhältnis $h_m : h_M$ beträgt vorzugsweise nicht mehr als 0,75.
- Das durch das Kristallisieren des Einkristalls verursachte Absinken der Schmelze wird durch ein Anheben des Quarz-Tiegels ausgeglichen.

Weiterhin findet ein Erhitzen der Schmelze von oben statt und zwar sowohl im Bereich der Phasengrenze zwischen dem wachsenden Einkristall und der Schmelze als auch im Bereich der Oberfläche der Schmelze, genauer im Bereich der Oberfläche der Schmelze zwischen einem Hitzeschild, der den wachsenden Einkristall umgibt, und der Wand des Quarz-Tiegels. Beides geschieht mittels zweier Heizeinrichtungen nahezu unbeeinflusst voneinander, weil der Hitzeschild das zusätzliche Erhitzen des jeweils anderen Bereichs durch eine der zwei Heizeinrichtungen blockiert.

- Das Erhitzen der Schmelze von oben im Bereich der Phasengrenze zwischen dem wachsenden Einkristall und der Schmelze dient insbesondere der Regelung des axialen Temperaturgradienten G an der Phasengrenze zwischen dem wachsenden Einkristall und der Schmelze. Es ist bekannt, dass die Bildung von Eigenpunktdefekten (Silizium-Zwischengitteratome und Leerstellen) und deren

Agglomeraten maßgeblich vom Quotienten V/G der Ziehgeschwindigkeit V und dem axialen Temperaturgradienten G abhängt. Der axiale Temperaturgradient G kann mittels Simulationsrechnungen näherungsweise berechnet und durch die Konstruktion der näheren Umgebung des wachsenden Einkristalls, der hot zone, wesentlich
5 beeinflusst werden. Der Einkristall aus Silizium wird mit einer Ziehgeschwindigkeit V gemäß der CZ-Methode gezogen, vorzugsweise mit einer Ziehgeschwindigkeit V , die ein V/G nach sich zieht, das zur Folge hat, dass im wachsenden Einkristall Silizium-Zwischengitteratome keine Agglomerate bilden und dass die Konzentration an freien Leerstellen, deren Präsenz das Entstehen von thermischen Donatoren begünstigt,
10 möglichst gering ist, vorzugsweise nicht mehr als $3 \times 10^{14} / \text{cm}^3$. Dementsprechend ist es besonders bevorzugt, den Quotienten V/G derart zu regeln, dass vom Zentrum bis zum Rand des Einkristalls Leerstellen dominieren, ohne Agglomerate zu bilden, die als COP-Defekte (crystal originated particles) nachweisbar sind und/oder dass vom Zentrum bis zum Rand des Einkristalls Silizium-Zwischengitteratome dominieren,
15 ohne Agglomerate zu bilden, die als Lpit-Defekte (large etch pits) nachweisbar sind.

Das Erhitzen der Schmelze von oben im Bereich einer Oberfläche der Schmelze trägt dazu bei, die Strömungsverhältnisse und das Temperaturfeld in der Schmelze zu erzeugen, die nötig sind, um die Sauerstoff-Konzentration im Einkristall aus Silizium
20 auf weniger als $2,2 \times 10^{17} \text{ Atome/cm}^3$ zu begrenzen.

Darüber hinaus wird ein Magnetfeld an die Schmelze gelegt, vorzugsweise ein CUSP-Feld, also ein Magnetfeld mit einer Struktur der Feldlinien, die axialsymmetrisch zur Drehachse des Quarz-Tiegels ist. Das Magnetfeld hat vorzugsweise eine maximale
25 Flussdichte von 700 - 1300 Gauß. Die Ebene des Magnetfelds mit der geringsten magnetischen Flussdichte liegt vorzugsweise mit einem Abstand von 80 mm bis 160 mm über der Oberfläche der Schmelze oder mit einem Abstand von 120 mm bis 220 mm unter der Oberfläche der Schmelze.

30 Um die Entstehung thermischer Donatoren zusätzlich einzudämmen, umfasst das Verfahren vorzugsweise das Abkühlen des wachsenden Einkristalls aus Silizium im Temperaturbereich von 500 °C bis 400 °C mit einer Abkühlrate von nicht weniger als 0,15 °C/min und nicht mehr als 0,6 °C/min, vorzugsweise nicht mehr als 0,25 °C/min. Es wurde festgestellt, dass die Konzentration an thermischen Donatoren mit
35 steigender Abkühlrate abnimmt. Allerdings sollte eine Abkühlrate von größer als 0,6

°C/min nicht angestrebt werden, weil das zu Lasten der Homogenität der Konzentration an Leerstellen in radialer Richtung geht. Dementsprechend sollte berücksichtigt werden, dass die Abkühlrate mit zunehmender Ziehgeschwindigkeit üblicherweise größer wird.

5

Um die Variation des spezifischen elektrischen Widerstands im Abschnitt des Einkristalls einzudämmen, der zu Halbleiterscheiben aus einkristallinem Silizium weiterverarbeitet wird, wird die Schmelze mit Dotierstoff vom p-Typ gegendotiert, vorzugsweise indem ein Gas, das den Dotierstoff vom p-Typ enthält, beispielsweise eine Mischung von Diboran und Argon, zur Oberfläche der Schmelze geleitet wird. Dieses Gas wird dann in einem Abstand von vorzugsweise 5 mm bis 50 mm zur Oberfläche der Schmelze in die Atmosphäre über der Schmelze eingeleitet.

10

Zur Steigerung der Ausbeute an Halbleiterscheiben aus einkristallinem Silizium ist es vorteilhaft und daher bevorzugt, mit dem Gegendotieren erst zu beginnen, nachdem mindestens 20 %, besonders bevorzugt mindestens 30 % des Abschnitts des Einkristalls kristallisiert sind, der wegen seines einheitlichen Durchmessers zur Herstellung von Halbleiterscheiben geeignet ist. Solange mit dem Gegendotieren noch nicht begonnen wurde, kann im Fall einer Versetzungsbildung im Einkristall das bis zu diesem Ereignis kristallisierte Material zurückgeschmolzen und das zurückgeschmolzene Material für einen neuen Züchtungsversuch mitverwendet werden, weil die dann resultierende Schmelze die gleiche Zusammensetzung hat, wie die ursprünglich eingesetzte Schmelze am Anfang der Kristallzüchtung. Enthält das zurückgeschmolzene Material bereits Dotierstoff beider Typen, ist das nicht mehr der Fall. Die relative Häufigkeit des Ereignisses der Versetzungsbildung ist am Anfang der Kristallzüchtung am größten, weshalb es vorteilhaft ist, mit dem Gegendotieren möglichst lange zu warten.

15

20

25

Gegenstand der Erfindung ist auch eine Vorrichtung zur Herstellung einer Halbleiterscheibe aus einkristallinem Silizium gemäß der CZ-Methode, umfassend einen Quarz-Tiegel zur Aufnahme einer Schmelze aus Silizium, in dem die Schmelze eine anfängliche Höhe h_M hat;
eine Einrichtung zum Beaufschlagen der Schmelze mit einem Magnetfeld;
einen Hitzeschild zum Abschirmen eines wachsenden Einkristalls aus Silizium;

30

eine erste Heizeinrichtung zum Erhitzen der Schmelze von der Seite mit einer unteren Begrenzung, deren Abstand h_s zu einer Oberfläche der Schmelze kleiner ist, als die anfängliche Höhe h_M der Schmelze;

eine zweite Heizeinrichtung zum Erhitzen der Schmelze von oben im Bereich einer

- 5 Phasengrenze zwischen dem wachsenden Einkristall und der Schmelze; und
eine dritte Heizeinrichtung zum Erhitzen der Schmelze von oben, die um den Hitzeschild herum zwischen einer Wand des Tiegels und dem Hitzeschild angeordnet ist.

- 10 Die Einrichtung zum Beaufschlagen der Schmelze mit einem Magnetfeld ist vorzugsweise eine Einrichtung zum Beaufschlagen der Schmelze mit einem Magnetfeld vom CUSP-Typ.

Die Höhe h_M der Schmelze bezeichnet die größte anfängliche Höhe der Schmelze.

- 15 Hat der Quarz-Tiegel einen Boden, der konvex nach unten gewölbt ist, bezeichnet die anfängliche Höhe h_M der Schmelze die anfängliche Höhe der Schmelze in der Mitte des Quarz-Tiegels.

Die erste Heizeinrichtung zum Erhitzen der Schmelze von der Seite ist vorzugsweise
20 eine Widerstandsheizung und hat eine untere Begrenzung. Der anfängliche Abstand h_s zwischen der unteren Begrenzung der ersten Heizeinrichtung und der Oberfläche der Schmelze hat annähernd die Länge der anfänglichen Höhe h_M des oberen Volumens der Schmelze und ist kleiner, als die anfängliche Höhe h_M der Schmelze. Das Verhältnis $h_s : h_M$ beträgt vorzugsweise nicht mehr als 0,75.

- 25 Die zweite und dritte Heizeinrichtung zum Erhitzen der Schmelze von oben umfassen vorzugsweise Widerstandsheizungen mit Heizelementen, die zu Ringen geformt sind. Im Fall der dritten Heizeinrichtung hat der Ring im Querschnitt ein Aspekt-Verhältnis (Höhe zu Breite) von vorzugsweise nicht mehr als 0,35, um einen möglichst hohen
30 Anteil an Wärme zur Oberfläche der Schmelze abgeben zu können. Der Abstand, den der Ring der dritten Heizeinrichtung zur Wand des Quarz-Tiegels hat und sein Abstand zum Hitzeschild betragen jeweils vorzugsweise nicht weniger als 10 mm. Die dritte Heizeinrichtung kann nach oben hin thermisch isoliert sein, vorzugsweise durch eine wärmedämmende Abdeckung, die darüber angeordnet ist.

Vorzugsweise ist ein Glasrohr Bestandteil der erfindungsgemäßen Vorrichtung, das zur Oberfläche der Schmelze gerichtet ist und dessen unteres Ende einen Abstand von 5 mm bis 50 mm zur Oberfläche der Schmelze hat. Dotierstoff vom p-Typ enthaltendes Gas wird beim Gegendotieren durch das Glasrohr geleitet.

5

Darüber hinaus kann die erfindungsgemäße Vorrichtung eine Kühlvorrichtung aufweisen, die den wachsenden Einkristall umgibt.

Die bezüglich der vorstehend aufgeführten Ausführungsformen des
10 erfindungsgemäßen Verfahrens angegebenen Merkmale können entsprechend auf die erfindungsgemäße Vorrichtung übertragen werden. Umgekehrt können die bezüglich der vorstehend ausgeführten Ausführungsformen der erfindungsgemäßen Vorrichtung angegebenen Merkmale entsprechend auf das erfindungsgemäße
15 Verfahren übertragen werden. Diese und andere Merkmale der erfindungsgemäßen Ausführungsformen werden in der Figurenbeschreibung und in den Ansprüchen erläutert. Die einzelnen Merkmale können entweder separat oder in Kombination als Ausführungsformen der Erfindung verwirklicht werden. Weiterhin können sie vorteilhafte Ausführungen beschreiben, die selbstständig schutzfähig sind.

20 Die Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf Zeichnungen weiter erläutert.

Fig. 1 zeigt schematisch eine Vorrichtung zur Herstellung einer Halbleiterscheibe aus einkristallinem Silizium gemäß der CZ-Methode mit Merkmalen der Erfindung vor dem Ziehen eines Einkristalls.

25

Fig. 2 zeigt die Vorrichtung gemäß Fig.1 während des Ziehens eines Einkristalls.

Fig. 3 zeigt eine mögliche Ausgestaltung der Heizeinrichtung zum Erhitzen der Schmelze von oben im Bereich der Oberfläche der Schmelze.

30

Die Vorrichtung gemäß Fig.1 umfasst ein Gehäuse 1, in dem ein Quarz-Tiegel 2 untergebracht ist. Der Quarz-Tiegel 2 kann gedreht, angehoben und abgesenkt werden. Im Quarz-Tiegel 2 befindet sich eine Schmelze 3 aus Silizium, die von oben, von der Seite und im gezeigten Anwendungsbeispiel auch von unten erhitzt wird.

Außerhalb des Gehäuses 1 ist eine Einrichtung 9 zum Beaufschlagen der Schmelze 3 mit einem Magnetfeld vorgesehen. Zum Erhitzen der Schmelze 3 von der Seite steht eine erste Heizeinrichtung 4 zur Verfügung, die um den Quarz-Tiegel 2 herum angeordnet ist. Eine zweite Heizeinrichtung 5 zum Erhitzen der Schmelze 3 von oben im Bereich einer Phasengrenze zwischen einem wachsenden Einkristall 6 und der Schmelze 3 ist in geringem Abstand zur Oberfläche 7 der Schmelze 3 angeordnet, ebenso wie eine dritte Heizeinrichtung 8, die zum Erhitzen der Schmelze von oben im Bereich der Oberfläche 7 der Schmelze 3 vorgesehen ist. Zwischen der zweiten und der dritten Heizeinrichtung befindet sich ein Hitzeschild 10, der den wachsenden Einkristall 6 umgibt, der von der Oberfläche 7 der Schmelze 3 weg nach oben gezogen wird. Der Abstand zwischen einem unteren Ende 11 des Hitzeschildes 10 und der Oberfläche 7 der Schmelze 3 bleibt während des Wachstums des Einkristalls 6 im Wesentlichen unverändert, da der Quarz-Tiegel 2 so angehoben wird, dass die Oberfläche 7 der Schmelze 3 trotz des Wachstums des Einkristalls 6 weder absinkt noch ansteigt. Konzentrisch zum Hitzeschild 10 und von diesem umgeben ist eine Kühlvorrichtung 15 angeordnet. Unter dem Quarz-Tiegel 2 befindet sich eine vierte Heizeinrichtung 12 zum Erhitzen der Schmelze von unten.

Wie in Fig.2 dargestellt, ändert sich der Abstand zwischen dem unteren Ende 11 des Hitzeschildes während des Ziehens des Einkristalls 6 im Wesentlichen nicht. Gleiches gilt nicht für den Abstand h_s zwischen der unteren Begrenzung der ersten Heizeinrichtung 4 und der Oberfläche der Schmelze 7, der wegen des Anhebens des Quarz-Tiegels 2 im Verlauf des Wachstums des Einkristalls 6 abnimmt.

Die dritte Heizeinrichtung 8 kann ausgestaltet sein, wie es in Fig. 3 dargestellt ist. Sie umfasst im Wesentlichen einen Ring 13, der als Heizelement arbeitet und Stromzuführungen 14 zum Zuführen von elektrischem Strom in den Ring und zum Halten des Rings über der Oberfläche 7 der Schmelze.

30 **Liste der verwendeten Bezugszeichen**

1 Gehäuse

2 Quarz-Tiegel

- 3 Schmelze
- 4 erste Heizeinrichtung
- 5 5 zweite Heizeinrichtung
- 6 Einkristall
- 7 Oberfläche der Schmelze
- 8 dritte Heizeinrichtung
- 9 Einrichtung zum Beaufschlagen der Schmelze mit einem Magnetfeld
- 10 10 Hitzeschild
- 11 unteres Ende des Hitzeschildes
- 12 vierte Heizeinrichtung
- 13 Ring
- 14 Stromzuführungen
- 15 15 Kühlvorrichtung

15 Detaillierte Beschreibung erfindungsgemäßer Ausführungsbeispiele

Einkristalle aus Silizium wurden nach der CZ-Methode in einer Vorrichtung mit erfindungsgemäßen Merkmalen gezogen und zu n-dotierten Halbleiterscheiben mit einem Durchmesser von 300 mm verarbeitet.

- 20 Die Sauerstoff-Konzentration eines großen Teils der Halbleiterscheiben war kleiner als $2,2 \times 10^{17}$ Atome/cm³ (new ASTM) und der radiale Verlauf der Sauerstoff-Konzentration bis in den Randbereich sehr homogen.

- 25 Fig.4 zeigt den typischen Verlauf der Konzentration an interstitiellem Sauerstoff [O_i] solcher Halbleiterscheiben in Abhängigkeit der radialen Position r und Fig.5 mit höherer Auflösung den entsprechenden Konzentrationsverlauf in einem Randbereich umfassend die radialen Positionen 130 mm bis 150 mm.

- 30 Die Dichte an thermischen Donatoren in diesen Halbleiterscheiben war kleiner als 3×10^{13} /cm³ und wurde mittels Widerstandsmessung bestimmt. Die Widerstandsmessung erfolgte vor und nach einer RTA-Wärmebehandlung bei 743 °C über einen Zeitraum von 10 s. Die aus der Widerstandsdifferenz errechnete Dotierstoffkonzentration entspricht der Dichte an thermischen Donatoren.

Teilweise wurde mit dem Ziehen des Abschnitts des Einkristalls mit einheitlichem Durchmesser und dem Gegendotieren gleichzeitig begonnen, teilweise wurde das Gegendotieren erst eingeleitet, nachdem 40 % der Länge des Abschnitts kristallisiert waren. Es wurde festgestellt, dass das spätere Gegendotieren einen

- 5 Ausbeutezuwachs von 10 % einbrachte, wenn von den Halbleiterscheiben zu erfüllen war, dass vom Zentrum bis zum Rand der Halbleiterscheiben die Sauerstoff-Konzentration kleiner als $2,2 \times 10^{17}$ Atome/cm³ ist und der spezifische Widerstand vom Mittelwert um nicht mehr als 13 % abweicht.
- 10 Die vorstehende Beschreibung beispielhafter Ausführungsformen ist exemplarisch zu verstehen. Die damit erfolgte Offenbarung ermöglicht es dem Fachmann einerseits, die vorliegende Erfindung und die damit verbundenen Vorteile zu verstehen, und umfasst andererseits im Verständnis des Fachmanns auch offensichtliche Abänderungen und Modifikationen der beschriebenen Strukturen und Verfahren.
- 15 Daher sollen alle derartigen Abänderungen und Modifikationen sowie Äquivalente durch den Schutzbereich der Ansprüche abgedeckt sein.