(19) Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 11 2014 003 533 T5** 2016.04.14

(12) # Veröffentlichung

der internationalen Anmeldung mit der
(87) Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2015/015800**
in deutscher Übersetzung (Art. III § 8 Abs. 2 IntPatÜG)
(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2014 003 533.5**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/JP2014/003974**
(86) PCT-Anmeldetag: **29.07.2014**
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **05.02.2015**
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
in deutscher Übersetzung: **14.04.2016**

(51) Int Cl.: ***H01L 21/338*** (2006.01)
C23C 16/34 (2006.01)
H01L 21/205 (2006.01)
H01L 29/778 (2006.01)
H01L 29/812 (2006.01)

(30) Unionspriorität:
2013-158365 **30.07.2013** **JP**

(71) Anmelder:
Sumitomo Chemical Company, Limited, Tokyo, JP

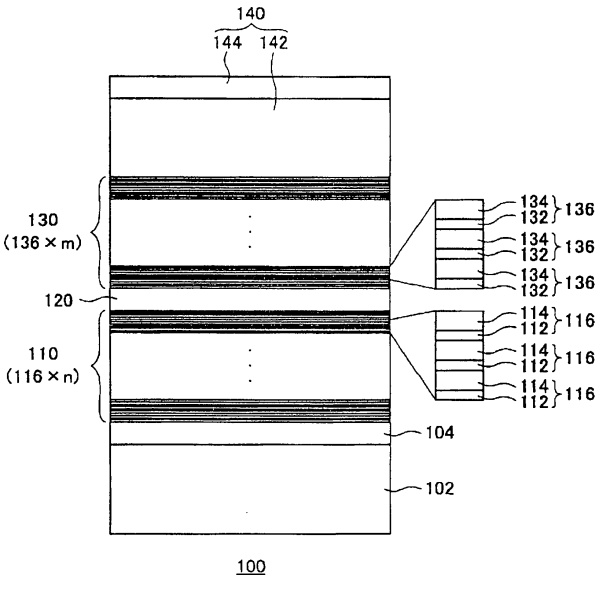
(74) Vertreter:
VOSSIUS & PARTNER Patentanwälte Rechtsanwälte mbB, 81675 München, DE

(72) Erfinder:
Sazawa, Hiroyuki, Tsukuba-shi, Ibaraki, JP

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Halbleiterwafer und Verfahren zur Herstellung des Halbleiterwafers**

(57) Zusammenfassung: Ein Halbleiterwafer schließt erste und zweite Übergitterschichten ein. Die erste Übergitterschicht beinhaltet die erste Einheitsschicht, von der jede erste und zweite Schichten beinhaltet, die zweite Übergitterschicht beinhaltet zweite Einheitsschichten, von der jede dritte und vierte Schichten beinhaltet, die erste Schicht ist aus $Al_{x1}Ga_{1-x1}N$ ($0 < x1 \leq 1$) gebildet, die zweite Schicht ist aus $Al_{y1}Ga_{1-y1}N$ ($0 \leq y1 < 1$, $x1 > y1$) gebildet, die dritte Schicht besteht aus $Al_{x2}Ga_{1-x2}N$ ($0 < x2 \leq 1$), die vierte Schicht besteht aus $Al_{y2}Ga_{1-y2}N$ ($0 \leq y2 < 1$, $x2 > y2$), eine mittlere Gitterkonstante der ersten Übergitterschicht unterscheidet sich von der der zweiten Übergitterschicht, und eine oder mehrere Schichten, ausgewählt aus den ersten und zweiten Übergitterschichten, enthalten Fremdatome, die die Durchschlagspannung verbessern und eine Konzentration von mehr als 7×10^{18} [Atome/cm^3] aufweisen.



Beschreibung

Technisches Fachgebiet

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft einen Halbleiterwafer und ein Verfahren zur Herstellung eines Halbleiterwafers.

Stand der Technik

[0002] Es sind Verfahren zum Bilden von Nitrid-Halbleiterkristallschichten hoher Qualität auf Siliciumwafern zur Verwendung für Vorrichtungen mit hoher Durchschlagspannung erwünscht. Die nicht-Patentdruckschrift 1 offenbart eine Struktur, in der eine Pufferschicht, eine Übergitterstruktur und eine Galliumnitridschicht in der angegebenen Reihenfolge auf der Silicium(111)-Ebene angeordnet sind. Hier stellt die Galliumnitridschicht eine aktive Schicht eines Transistors bereit. Diese Struktur kann verringerten Verzug des Wafers durch das Vorhandensein der Übergitterstruktur erreichen und ist so insofern vorteilhaft, als eine relativ dicke Galliumnitridschicht leicht gebildet werden kann und eine Nitrid-Halbleiterkristallschicht mit hoher Durchschlagspannung leicht erhalten werden kann. Wenn die Nitridhalbleiter-Kristallschicht dicker gemacht wird, um die Durchschlagspannung zu erhöhen, nimmt jedoch der Verzug des Wafers zu und kann den möglichen Bereich des Verzugs für den Herstellungsschritt der Vorrichtung überschreiten. Die in den Patentdruckschriften 1 und 2 offenbarten Verfahren sind zur Steuerung des Umfangs des Verzugs des Wafers bekannt.

[0003] Gemäß dem in der Patentdruckschrift 1 offenbarten Verfahren wird eine erste GaN/AlN Übergitterschicht auf einem Wafer gebildet. In der ersten GaN/AlN Übergitterschicht befinden sich mehrere Paare einer GaN Schicht und einer AlN Schicht derart übereinander, dass die GaN Schichten und die AlN Schichten sich abwechselnd übereinander befinden. Zusätzlich wird eine zweite GaN/AlN Übergitterschicht gebildet und ist in Kontakt mit der ersten GaN/AlN Übergitterschicht. In der zweiten GaN/AlN Übergitterschicht befinden sich mehrere Paare einer GaN Schicht und einer AlN Schicht derart übereinander, dass die GaN Schichten und die AlN Schichten sich abwechselnd übereinander befinden. Auf der zweiten GaN/AlN Übergitterschicht wird eine Schicht zum Betrieb der Vorrichtung, gebildet durch eine GaN Elektronentransportschicht und eine AlGaN Elektronenzufuhrschicht, gebildet. Hier offenbart die Patentdruckschrift 1, dass die Beziehung LC1 < LC2 < LC3 erfüllt ist, wobei LC1 die mittlere Gitterkonstante der C-Achse der ersten GaN/AlN Übergitterschicht, LC2 die mittlere Gitterkonstante der C-Achse der zweiten GaN/AlN Übergitterschicht und LC3 die mittlere Gitterkonstante der C-Achse der GaN Elektronentransportschicht bezeichnet.

[0004] Die Patentdruckschrift 2 offenbart einen epitaktischen Wafer, in dem eine Reihe von Nitridschichten der Gruppe III auf dem (111) monokristallinen Si Wafer derart gebildet wird, dass die (0001) Kristallebene im Wesentlichen parallel zur Oberfläche des Wafers ist. Der epitaktische Wafer schließt eine Pufferschicht und eine Kristallschicht, gebildet auf der Pufferschicht, ein, und die Pufferschicht wird durch abwechselndes Übereinanderlegen der ersten Einheiten des Übereinanderlegens und zweiten Einheiten des Übereinanderlegens derart gebildet, dass die oberen und unteren Teile beide durch die ersten Einheiten des Übereinanderlegens gebildet werden. Die erste Einheit des Übereinanderlegens schließt eine Schicht der Änderung der Zusammensetzung und eine erste Zwischenschicht ein. In der Schicht der Änderung der Zusammensetzung werden erste Einheitsschichten und zweite Einheitsschichten mit unterschiedlichen Zusammensetzungen wiederholt und abwechselnd übereinandergelegt, so dass eine Druckbeanspruchung darin eingeschlossen ist. Die erste Zwischenschicht erhöht die in der Schicht der Änderung der Zusammensetzung eingeschlossene Druckbeanspruchung. Die zweite Einheit des Übereinanderlegens wird als eine zweite Zwischenschicht ohne wesentliche Spannung gebildet.

[Druckschriften des Stands der Technik]

[Patentdruckschriften]

[0005]

Patentdruckschrift 1: Japanische Patentanmeldung Veröffentlichung Nr. 2011-238685

Patentdruckschrift 2: Internationale Veröffentlichung Nr. WO 2011/102045

[Nicht-Patentdruckschriften]

[0006]

Nicht-Patentdruckschrift 1: „High quality GaN grown an Si(111) by gas source molecular beam epitaxy with ammonia", S. A. Nikishin et al., Applied Physics letter, Band 75, 2073 (1999)

Offenbarung der Erfindung

Durch die Erfindung zu lösende Probleme

[0007] Um eine Nitrid-Halbleiterkristallschicht mit hoher Durchschlagspannung zu erhalten, haben die jetzigen Erfinder Experimente durchgeführt und die Ergebnisse, Fremdatome, wie Kohlenstoffatome, in eine Trägerschicht (eine Übergitterschicht) der Nitrid-Halbleiterkristallschicht einzuführen, überprüft. Die jetzigen Erfinder haben die vorstehend aufgeführte Näherung bestätigt, dass ein einfaches Einführen von Fremdatomen Probleme aufweist. Genauer wird die Spannung in der Übergitterschicht, die zur Steuerung des Umfangs des Verzugs des Wafers bereitge-

stellt wird, entspannt, und ihre Wirkung der Steuerung des Umfangs des Verzugs des Wafers wird unterlaufen. Mit anderen Worten haben die jetzigen Erfinder folgendes geschlossen. Die in den vorstehend aufgeführten Patentdruckschriften 1 und 2 offenbarten Verfahren zur Steuerung des Umfangs des Verzugs des Wafers können nur verwendet werden, wenn keine Fremdatome eingeführt wurden, um die Durchschlagspannung zu verbessern, oder wenn nur eine kleine Menge an Fremdatomen eingeführt wurde. Die in den Patentdruckschriften 1 und 2 offenbarten Verfahren können den Umfang des Verzugs des Wafers nicht mehr steuern, wenn Fremdatome in einem solchen Ausmaß eingeführt wurden, dass die Durchschlagspannung wesentlich verbessert wird.

[0008] Die Aufgaben der vorliegenden Erfindung sind, einen Halbleiterwafer mit einer solchen Schichtstruktur bereitzustellen, dass die Übergitterschicht, die als eine Trägerschicht der Nitrid-Halbleiterkristallschicht dient, ihre Wirkungen der Steuerung des Umfangs des Verzugs beibehält, auch wenn die Supergitterschicht mit einer solchen Menge an Fremdatomen dotiert wurde, dass die Durchschlagspannung wirksam und ausreichend verbessert ist, und ein Verfahren zur Herstellung des Halbleiterwafers bereitzustellen.

Maßnahmen zu Lösen der Probleme

[0009] Um die vorstehend-erwähnten Aufgaben zu lösen, ist eine erste Ausführungsform der vorliegenden Erfindung, einen Halbleiterwafer bereitzustellen, umfassend einen Trägerwafer, eine erste Übergitterschicht, eine Verbindungsschicht, eine zweite Übergitterschicht und eine Nitrid-Halbleiterkristallschicht. Hier sind der Trägerwafer, die erste Übergitterschicht, die Verbindungsschicht, die zweite Übergitterschicht und die Nitrid-Halbleiterkristallschicht in einer Reihenfolge des Trägerwafers, der ersten Übergitterschicht, der Verbindungsschicht, der zweiten Übergitterschicht und der Nitrid-Halbleiterkristallschicht angeordnet, wobei die erste Übergitterschicht mehrere erste Einheitsschichten beinhaltet, von denen jede aus einer ersten Schicht und einer zweiten Schicht aufgebaut ist, die zweite Übergitterschicht mehrere zweite Einheitsschichten beinhaltet, von denen jede aus einer dritten Schicht und einer vierten Schicht aufgebaut ist, die erste Schicht aus $Al_{x1}Ga_{1-x1}N$ ($0 < x1 \leq 1$) gebildet ist, die zweite Schicht aus $Al_{y1}Ga_{1-y1}N$ ($0 \leq y1 < 1$, $x1 > y1$) gebildet ist, die dritte Schicht aus $Al_{x2}Ga_{1-x2}N$ ($0 < x2 \leq 1$) besteht, die vierte Schicht aus $Al_{y2}Ga_{1-y2}N$ ($0 \leq y2 < 1$, $x2 > y2$) besteht, eine mittlere Gitterkonstante der ersten Übergitterschicht sich von einer mittleren Gitterkonstante der zweiten Übergitterschicht unterscheidet, eine oder mehrere Schichten, ausgewählt aus der ersten Übergitterschicht und der zweiten Übergitterschicht, Fremdatome enthalten, die eine Durchschlagspannung verbessern und die eine Konzentration von mehr als 7×10^{18} [Atome/cm^3] aufweisen.

[0010] Die Fremdatome können eine oder mehrere Arten, ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus C-Atomen, Fe-Atomen, Mn-Atomen, Mg-Atomen, V-Atomen, Cr-Atomen, Be-Atomen und B-Atomen, sein. Die Fremdatome sind vorzugsweise C-Atome oder Fe-Atome. Die Verbindungsschicht ist vorzugsweise eine Kristallschicht in Kontakt mit der ersten Übergitterschicht und der zweiten Übergitterschicht. Eine Zusammensetzung der Verbindungsschicht kann sich kontinuierlich in einer Dickerichtung der Verbindungsschicht von der ersten Übergitterschicht zu der zweiten Übergitterschicht ändern. In einer anderen Ausführungsform kann sich eine Zusammensetzung der Verbindungsschicht stufenweise in einer Dickerichtung der Verbindungsschicht von der ersten Übergitterschicht zu der zweiten Übergitterschicht ändern. Die Verbindungsschicht kann aus $Al_zGa_{1-z}N$ ($0 \leq z \leq 1$) hergestellt sein. Die Dicke der Verbindungsschicht ist vorzugsweise größer als eine Dicke jeder der ersten Schicht, der zweiten Schicht, der dritten Schicht und der vierten Schicht. Eine mittlere Gitterkonstante der Verbindungsschicht ist vorzugsweise geringer als eine mittlere Gitterkonstante jeder der ersten Übergitterschicht und der zweiten Übergitterschicht.

[0011] Eine zweite Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist, ein Verfahren zur Herstellung des Halbleiterwafers der ersten Ausführungsform bereitzustellen. Das Herstellungsverfahren schließt n-faches Bilden der ersten Übergitterschicht durch Bilden der ersten Einheitsschicht, welche aus der ersten Schicht und der zweiten Schicht aufgebaut ist, Bilden der Verbindungsschicht, m-faches Bilden der zweiten Übergitterschicht durch Bilden der zweiten Einheitsschicht, welche aus der dritten Schicht und der vierten Schicht aufgebaut ist, und Bilden der Nitrid-Halbleiterkristallschicht ein. Hier werden, während des ein- oder mehrfachen Bildens, ausgewählt aus dem Bilden der ersten Übergitterschicht und dem Bilden der zweiten Übergitterschicht, die eine oder mehrere der ersten Übergitterschicht und der zweiten Übergitterschicht so gebildet, dass sie Fremdatome enthalten, die eine Durchschlagspannung der einen oder mehreren der ersten Übergitterschicht und der zweiten Übergitterschicht verbessern und eine Konzentration von mehr als 7×10^{18} [Atome/cm^3] aufweisen.

[0012] Abhängig von einer Zusammensetzung und der Dicke der Nitrid-Halbleiterkristallschicht können ein oder mehrere Parameter, ausgewählt aus (i) einer Zusammensetzung jeder der ersten bis vierten Schicht, (ii) einer Dicke jeder der ersten bis vierten Schicht, (iii) der Zahl n der Einheitsschichten, die in der ersten Übergitterschicht enthalten sind, und (iv) der Zahl m der Einheitsschichten, die in der zweiten Übergitterschicht enthalten sind, so angepasst wer-

den, dass der Verzug des Halbleiterwafers, gemessen an einer Oberfläche der Nitrid-Halbleiterkristallschicht 50 µm oder weniger beträgt. Abhängig von der Zusammensetzung und der Dicke der Nitrid-Halbleiterkristallschicht werden die Zahl n der Einheitsschichten, die in der ersten Übergitterschicht enthalten sind, und die Zahl m der Einheitsschichten, die in der zweiten Übergitterschicht enthalten sind, vorzugsweise so eingestellt, dass der Verzug des Halbleiterwafers, gemessen an der Oberfläche der Nitrid-Halbleiterkristallschicht 50 µm oder weniger beträgt.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0013] Fig. 1 ist eine Querschnittansicht eines Halbleiterwafers **100**.

[0014] Fig. 2 ist eine Grafik, die den Umfang des Verzugs und die Durchschlagspannung in Bezug auf die Konzentration der Kohlenstoffatome für Halbleiterwafer der ersten Ausführung zeigt.

[0015] Fig. 3 ist eine Grafik, die den Umfang des Verzugs und die Durchschlagspannung in Bezug auf die Konzentration der Kohlenstoffatome für Halbleiterwafer des ersten Vergleichsbeispiels zeigt.

[0016] Fig. 4 ist eine Grafik, die den Umfang des Verzugs und die Durchschlagspannung in Bezug auf die Konzentration der Kohlenstoffatome für Halbleiterwafer des zweiten Vergleichsbeispiels zeigt.

[0017] Fig. 5 ist eine Grafik, die den Umfang des Verzugs und die Durchschlagspannung in Bezug auf die Konzentration der Kohlenstoffatome für Halbleiterwafer des dritten Vergleichsbeispiels zeigt.

[0018] Fig. 6 ist eine Grafik, die den Umfang des Verzugs und die Durchschlagspannung in Bezug auf die Konzentration der Kohlenstoffatome für Halbleiterwafer der zweiten Ausführung zeigt.

[0019] Fig. 7 ist eine Grafik, die den Umfang des Verzugs in Bezug auf die Konzentration der Kohlenstoffatome für Halbleiterwafer der ersten und zweiten Ausführung und des ersten bis dritten Vergleichsbeispiels zeigt.

[0020] Fig. 8 ist eine Grafik, die den Umfang des Verzugs und die Durchschlagspannung für Halbleiterwafer einer dritten Ausführung zeigt, in der die Zahlen der Einheitsschichten für die erste und zweite Übergitterschicht auf verschiedene Werte eingestellt werden.

[0021] Fig. 9 ist eine Grafik, die den Umfang des Verzugs für Halbleiterwafer einer vierten Ausführung zeigt, in der die Zahlen der Einheitsschichten der ersten und zweiten Übergitterschicht auf verschiedene Werte eingestellt werden.

[0022] Fig. 10 ist eine Grafik, die den Umfang des Verzugs in Bezug auf den Unterschied der mittleren Gitterkonstante für Halbleiterwafer einer fünften Ausführung zeigt.

Beste Ausführungsweise der Erfindung

[0023] Fig. 1 ist eine Querschnittansicht für einen Halbleiterwafer **100** gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Der Halbleiterwafer **100** schließt einen Trägerwafer **102**, eine Pufferschicht **104**, eine erste Übergitterschicht **110**, eine Verbindungsschicht **120**, eine zweite Übergitterschicht **130** und eine Nitrid-Halbleiterkristallschicht **140** ein. Der Trägerwafer **102**, die erste Übergitterschicht **110**, die Verbindungsschicht **120**, die zweite Übergitterschicht **130** und die Nitrid-Halbleiterkristallschicht **140** sind in der Reihenfolge des Trägerwafers **102**, der ersten Übergitterschicht **110**, der Verbindungsschicht **120**, der zweiten Übergitterschicht **130** und der Nitrid-Halbleiterkristallschicht **140** abgeschieden.

[0024] Der Trägerwafer **102** ist ein Träger zum Aufbringen der Pufferschicht **104** und der jeweiligen darauf befindlichen Schichten, die später beschrieben werden. Der Trägerwafer **102** kann aus jedem Material hergestellt werden, sofern der Trägerwafer **102** mechanische Festigkeit, die erforderlich ist, um die einzelnen Schichten aufzubringen, und thermische Stabilität aufweist, die ermöglicht, dass die einzelnen Schichten durch epitaktisches Wachstum und andere Verfahren gebildet werden. Der Trägerwafer **102** kann zum Beispiel ein Si-Wafer, ein blauer Korundwafer, ein Ge-Wafer, ein GaAs-Wafer, ein InP-Wafer oder ein ZnO-Wafer sein.

[0025] Die Pufferschicht **104** ist so angelegt, dass sie den Unterschied in der Gitterkonstante zwischen dem Trägerwafer **102** und der ersten Übergitterschicht **110** absorbiert. Die Pufferschicht **104** kann durch epitaktisches Wachstum gebildet werden, wobei die Reaktionstemperatur (die Temperatur des Wafers) auf 500°C bis 1000°C eingestellt wird. Wenn ein Si(111)-Wafer als Trägerwafer **102** verwendet wird, und eine Substanz auf AlGaN-Basis für die erste Übergitterschicht **110** verwendet wird, kann die Pufferschicht **104** zum Beispiel eine AlN Schicht sein. Die Pufferschicht **104** weist vorzugsweise eine Dicke von 10 nm bis 300 nm, stärker bevorzugt 50 nm bis 200 nm, auf.

[0026] Die erste Übergitterschicht **110**, die Verbindungsschicht **120** und die zweite Übergitterschicht **130** stellen eine Schichtstruktur bereit, die ermöglicht, dass der Umfang des Verzugs des Halbleiterwafers **100** eingedämmt wird, auch wenn eine ausreichende Menge an Fremdatomen eingeführt wurde, um die Durchschlagspannung zu verbessern. Die erste Übergitterschicht **110** weist mehrere erste Einheits-

schichten **116** auf, und die zweite Übergitterschicht **130** weist mehrere zweite Einheitsschichten **136** auf.

[0027] Die erste Einheitsschicht **116** ist durch eine erste Schicht **112** und eine zweite Schicht **114** aufgebaut, und die zweite Einheitsschicht **136** ist durch eine dritte Schicht **132** und eine vierte Schicht **134** aufgebaut. Die erste Schicht **112** ist aus $Al_{x1}Ga_{1-x1}N$ ($0 < x1 \leq 1$) gebildet, und die zweite Schicht **114** ist aus $Al_{y1}Ga_{1-y1}N$ ($0 \leq y1 < 1$, $x1 > y1$) gebildet. Die dritte Schicht **132** besteht aus $Al_{x2}Ga_{1-x2}N$ ($0 < x2 \leq 1$), und die vierte Schicht besteht aus $Al_{y2}Ga_{1-y2}N$ ($0 \leq y2 < 1$, $x2 > y2$).

[0028] Die erste Schicht **112**, die zweite Schicht **114**, die dritte Schicht **132** und die vierte Schicht **134** können durch epitaktisches Wachstum gebildet werden. Die erste Schicht **112** und die dritte Schicht **132** können zum Beispiel eine AlN Schicht sein, wenn x1 und x2 auf 1 eingestellt werden. Die erste Schicht **112** und die dritte Schicht **132** weisen vorzugsweise eine Dicke von 1 nm bis 10 nm, stärker bevorzugt 3 nm bis 7 nm, auf. Bezüglich der zweiten Schicht **114** und der vierten Schicht **134** können y1 und y2 in einem Bereich von 0,05 bis 0,25 eingestellt werden. Mit anderen Worten können die zweite Schicht **114** und die vierte Schicht **134** $Al_{0,05}Ga_{0,95}N$ bis $Al_{0,25}Ga_{0,75}N$ zum Beispiel sein. Die zweite Schicht **114** und die vierte Schicht **134** weisen vorzugsweise eine Dicke im Bereich von 10 nm bis 30 nm, stärker bevorzugt 15 nm bis 25 nm, auf.

[0029] Mehrere erste Einheitsschichten, von denen jede aus einer ersten Schicht **112** und einer zweiten Schicht **114** aufgebaut ist, bilden die erste Übergitterschicht **110**. Die mittlere Gitterkonstante a1 der ersten Übergitterschicht **110** kann durch Variieren der Zusammensetzungen (der Al-Verhältnisse) und der Dicken der ersten Schichten **112** und der zweiten Schichten **114** variiert werden. Die mittlere Gitterkonstante a1 der ersten Gitterschicht **110** kann als das Ergebnis der Gitterkonstante der ersten Schichten **112** × das Verhältnis der ersten Schichten **112** + der Gitterkonstante der zweiten Schichten **114** × das Verhältnis der zweiten Schichten **114** definiert werden. Die Zahl n der ersten Einheitsschichten **116**, die in die erste Übergitterschicht **110** enthalten sind, liegt vorzugsweise im Bereich von 1 bis 200, stärker bevorzugt 1 bis 150.

[0030] Mehrere zweite Einheitsschichten **136**, von denen jede durch die dritte Schicht **132** und die vierte Schicht **134** aufgebaut ist, bilden die zweite Übergitterschicht **130**. Die mittlere Gitterkonstante a2 der zweiten Übergitterschicht **130** kann durch Variieren der Zusammensetzungen (der Al Verhältnisse) und der Dicken der dritten Schichten **132** und der vierten Schichten **134** variiert werden. Die mittlere Gitterkonstante a2 der zweiten Übergitterschicht **130** kann als das Ergebnis der Gitterkonstante der dritten Schichten **132** × das Verhältnis der dritten Schichten **132** + die Gitterkonstante der vierten Schichten **134** × das Verhältnis der vierten Schichten definiert werden. Die Zahl m der zweiten Einheitsschichten **136**, die in der zweiten Übergitterschicht **130** enthalten sind, liegt vorzugsweise im Bereich von 1 bis 200, stärker bevorzugt 1 bis 150.

[0031] In dem Halbleiterwafer **100** unterschiedet sich die mittlere Gitterkonstante a1 der ersten Übergitterschicht **110** von der mittleren Gitterkonstante a2 der zweiten Übergitterschicht **130**, und eine oder mehrere Schichten, ausgewählt aus der ersten Übergitterschicht **110** und der zweiten Übergitterschicht **130** enthalten Fremdatome, die so festgelegt sind, dass sie die Durchschlagspannung erhöhen und eine Konzentration von mehr als 7×10^{18} [Atome/cm^3] aufweisen. Die Fremdatome können eine oder mehrere Arten, ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus C-Atomen, Fe-Atomen, Mn-Atomen, Mg-Atomen, V-Atomen, Cr-Atomen, Be-Atomen und B-Atomen, sein. Die Fremdatome sind vorzugsweise C-Atome oder Fe-Atome, insbesondere C-Atome.

[0032] Die Verbindungsschicht **120** wird so gebildet, dass sie die erste Übergitterschicht **110** und die zweite Übergitterschicht **130** miteinander verbindet. Die Verbindungsschicht **120** kann durch epitaktisches Wachstum gebildet werden. Die Verbindungsschicht **120** kann zum Beispiel aus $Al_zGa_{1-z}N$ ($0 \leq z \leq 1$) gebildet werden. Die Verbindungsschicht **120** kann eine Kristallschicht in Kontakt mit der ersten Übergitterschicht **110** und der zweiten Übergitterschicht **130** sein. Die Verbindungsschicht kann aus einer einzelnen oder mehreren Schichten bestehen. Zusätzlich kann sich die Zusammensetzung der Verbindungsschicht **120** in Dickerichtung ändern. Genauer kann die Zusammensetzung der Verbindungsschicht **120** sich kontinuierlich in der Dickerichtung der Verbindungsschicht **120** von der ersten Übergitterschicht **110** zu der zweiten Übergitterschicht **130** ändern. In einer anderen Ausführungsform kann sich die Zusammensetzung der Verbindungsschicht **120** stufenweise in der Dickerichtung der Verbindungsschicht **120** von der ersten Übergitterschicht **110** zu der zweiten Übergitterschicht **130** ändern. Die Dicke der Verbindungsschicht **120** kann größer als die Dicke jeder der ersten Schicht **112**, der zweiten Schicht **114**, der dritten Schicht **132** und der vierten Schicht **134** eingestellt werden. Die mittlere Gitterkonstante der Verbindungsschicht kann kleiner als die mittlere Gitterkonstante jeder der ersten Übergitterschicht **110** und der zweiten Übergitterschicht **130** eingestellt werden. Die Dicke der Verbindungsschicht **120** kann 20 bis 300 nm, vorzugsweise 25 bis 200 nm, stärker bevorzugt 30 bis 200 nm, insbesondere bevorzugt 30 bis 150 nm, betragen.

[0033] Die Nitrid-Halbleiterkristallschicht **140** kann eine Grundschicht der Vorrichtung **142** und eine akti-

ve Schicht **144** aufweisen. Eine Zunahme der Dicke der Grundschicht der Vorrichtung **142** kann eine höhere Durchschlagspannung einer Vorrichtung ergeben. In der aktiven Schicht **144** wird ein aktiver Bereich eines Transistors, wie ein Kanal, gebildet.

[0034] Gemäß dem Halbleiterwafer **100** der vorliegenden Ausführungsform kann hohe Durchschlagspannung von 450 V oder höher durch Einführen von Fremdatomen mit einer Konzentration von mehr als 7×10^{18} [Atome/cm^3] realisiert werden, und gleichzeitig kann der Umfang des Verzugs, gemessen an der Oberfläche der Nitrid-Halbleiterkristallschicht **140**, auf 50 µm (der absolute Wert) oder weniger verringert werden. Hier bedeutet der Umfang des Verzugs die Höhe der Mitte des Wafers in Bezug auf die Kante des Wafers und nimmt einen negativen Wert, wenn die Nitrid-Halbleiterkristallschicht **140** konvex wird, und einen positiven Wert an, wenn die Nitrid-Halbleiterkristallschicht **140** konkav wird.

[0035] Wie vorstehend aufgeführt kann der Umfang des Verzugs des Halbleiterwafers **100** noch auf 50 µm oder weniger (der absolute Wert) eingestellt werden, auch wenn die eingeführten Fremdatome eine Konzentration von 7×10^{18} [Atome/cm^3] erreichen, was eine hohe Durchschlagspannung von 450 V oder höher ergeben kann. Diese vorteilhafte Wirkung kann durch den folgenden Mechanismus bewirkt werden.

[0036] Wenn eine Kristallschicht auf GaN-Basis auf einem Si-Wafer angeordnet wird, wird der Kristall auf GaN-Basis Gitter-passend auf dem Si-Wafer bei hoher Temperatur gezüchtet und aufwärts konkav verzogen, nachdem die Temperatur verringert wird, da der thermische Expansionskoeffizient des Kristalls auf GaN-Basis höher ist als der thermische Expansionskoeffizient von Si. Wenn die Kristallschicht auf GaN-Basis aufwärts konkav verzogen wird, ist die Oberfläche der Kristallschicht auf GaN-Basis, die gegenüberliegende zum Si-Wafer ist, konkav. Hier wird ein Laminat einer oberen Übergitterschicht (USL) und einer unteren Übergitterschicht (LSL) zwischen dem Si-Wafer und der GaN-Schicht bereitgestellt. Die mittlere Gitterkonstante a_u der USL-Schicht und die mittlere Gitterkonstante a_L der LSL-Schicht werden derart konfiguriert, dass die Beziehung $a_u > a_L$ erfüllt ist. Auf diese Weise bildet die Spannung, die sich aus dem Unterschied in der mittleren Gitterkonstante zwischen der USL-Schicht und der LSL-Schicht ergibt, eine Druckbeanspruchung, die in der USL-Schicht wirkt, und eine Zugbeanspruchung, die auf die LSL-Schicht wirkt. Die Spannung, die auf das Laminat, gebildet durch die USL-Schicht und die LSL-Schicht (kann hier als die „USL/LSL-Struktur" bezeichnet werden), wirkt, bewirkt einen Verzug aufwärts konvex, der in die entgegen gesetzte Richtung zu dem vorstehend aufgeführten Verzug geht, der durch den Unterschied im thermischen Expansionskoeffizienten bewirkt wird. Demgemäß kann die USL/LSL-Struktur effizient den Verzug des Wafers verringern.

[0037] Hier wirkt die Spannung auf die USL/LSL-Struktur, wobei sich der Dreh- und Angelpunkt in der Nähe der Grenzfläche zwischen der USL-Schicht und der LSL-Schicht befindet. Es wird angenommen, dass der Dreh- und Angelpunkt eine Breite (mit einer Dicke in der Wachstumsrichtung) von etwa mehreren bis mehreren Dutzend Nanometer aufweist, da in Wirklichkeit der Kristall Dislokationen und unebene Grenzflächen aufweist. Wenn der GaN-Kristall viele Fremdatome, wie Kohlenstoffatome, enthält, bildet der GaN-Kristall leicht Defekte in der Nähe der Grenzflächen zwischen den angeordneten Schichten. Daher wird, wenn die USL/LSL-Struktur viele Fremdatome enthält, angenommen, dass viele Defekte an der Grenzfläche zwischen der USL-Schicht und der LSL-Schicht oder an den Übergitter-Grenzflächen zwischen der USL-Schicht und der LSL-Schicht gebildet werden. Wenn Kräfte auf solche Grenzflächen mit vielen Defekten wirken, wird angenommen, dass folglich eine Kristallisationsentspannung in der Nähe der Kristallgrenzflächen auftritt. Die Kristallisationsentspannung absorbiert die Spannung, die in der USL/LSL-Struktur gebildet wird, und die in der USL/LSL-Struktur gebildete Spannung trägt nicht mehr länger zu einem aufwärts konvexen Verzug bei. Mit anderen Worten steuert die USL/LSL-Struktur nicht mehr den Umfang des Verzugs des Wafers. Demgemäß wird ein Halbleiterwafer, der viele Kohlenstoffatome enthält, nur durch die Kraft beeinflusst, die sich aus dem Unterschied im thermalen Expansionskoeffizienten zwischen Si und GaN ergibt, und folglich signifikant abwärts konvex verzogen.

[0038] Um sich diesem Problem zu widmen, weist der Halbleiterwafer **100**, der die vorliegende Ausführungsform betrifft, eine Verbindungsschicht **120** zwischen der ersten Übergitterschicht **110** (äquivalent zu der vorstehend beschriebenen LSL-Schicht) und der zweiten Übergitterschicht **130** (äquivalent zu der vorstehend beschriebenen USL-Schicht) auf. Die Verbindungsschicht **120** dient als der Dreh- und Angelpunkt der Spannung, die durch den Unterschied in der mittleren Gitterkonstante zwischen der ersten Übergitterschicht **110** und der zweiten Übergitterschicht **130** gebildet wird. Die Verbindungsschicht **120** ist dicker als die erste Schicht **112**, die zweite Schicht **114**, die dritte Schicht **132** und die vierte Schicht **134**, die die erste Übergitterschicht **110** und die zweite Übergitterschicht **130** bilden, und weist eine geringe Dichte der Grenzflächen pro Längeneinheit in der Wachstumsrichtung (der Dickerichtung) auf. So wird die Verbindungsschicht **120** weniger wahrscheinlich durch die Entspannung an den Grenzflächen beeinflusst. Demgemäß ermöglicht, auch wenn die erste Übergitterschicht **110** oder die zweite Übergitterschicht **130** viele Kohlenstoff-

atome enthält, die Verbindungsschicht **120**, dass die Spannung in der ersten Übergitterschicht **110** gebrochen wird und die Spannung, die in der zweiten Übergitterschicht **130** gebildet wird, gegenseitig übertragen wird. Das soll heißen, der Umfang des Verzugs kann gesteuert werden. Folglich kann der Verzug des Halbleiterwafers **100** verringert werden.

[0039] Zusätzlich verringert, da die Verbindungsschicht **120** dicker als die erste Schicht **112**, die zweite Schicht **114**, die dritte Schicht **132** und die vierte Schicht **134** ist, die die erste Übergitterschicht **110** und die zweite Übergitterschicht **130** aufbauen, die Verbindungsschicht **120** auch wirksam während ihres Wachstums die Defekte, wie Dislokalisationen, die an den Grenzflächen gebildet werden. Der Grund ist die Tatsache, dass Dislokalisationen, die Burger-Vektoren mit entgegen gesetztem Vorzeichen aufweisen, während ihres Wachstums miteinander kombiniert werden. Als Ergebnis kann die Verbindungsschicht **120** zur Verringerung von Defekten nicht nur an den Grenzflächen, sondern auch in den Massekristallen beitragen. So wird angenommen, dass die Verbindungsschicht **120** ermöglichen kann, dass die Spannung wirksamer übertragen wird. Aus den vorstehend beschriebenen Gründen kann, auch wenn die erste Übergitterschicht **110** oder die zweite Übergitterschicht **130** eine hohe Konzentration an Kohlenstoffatomen aufweist, der Verzug des Wafers verringert werden.

[0040] Der vorstehend beschriebene Halbleiterwafer **100** kann mit dem folgenden Herstellungsverfahren hergestellt werden. Die Pufferschicht **104** wird auf dem Trägerwafer **102** gebildet. Danach wird die erste Einheitsschicht **116** n-fach gebildet, um die erste Übergitterschicht **110** zu bilden. Hier ist die erste Einheitsschicht **116** aus der ersten Schicht **112** und der zweiten Schicht **114** aufgebaut. Danach wird die Verbindungsschicht **120** gebildet, und die zweite Einheitsschicht **136** wird m-fach gebildet, um die zweite Übergitterschicht **130** zu bilden. Hier ist die zweite Einheitsschicht **136** aus der dritten Schicht **132** und der vierten Schicht **134** aufgebaut. Außerdem kann die Nitrid-Halbleiterkristallschicht **140** gebildet werden. Hier werden während einer oder mehrerer Bildungen, ausgewählt aus der Bildung der ersten Übergitterschicht **110** und der Bildung der zweiten Übergitterschicht **130**, eine oder mehrere der Schichten **110** und **130** derart gebildet, dass die Schichten Fremdatome enthalten, die die Durchschlagspannung der Schichten verbessern und die eine höhere Konzentration als 7×10^{18} [Atome/cm^3] aufweisen.

[0041] Die erste Schicht **112**, die zweite Schicht **114**, die Verbindungsschicht **120**, die dritte Schicht **132**, die vierte Schicht **134** und die Nitrid-Halbleiterkristallschicht **140** können durch epitaktisches Wachstum gebildet werden. Das epitaktische Wachstum kann unter Verwendung von zum Beispiel MOCVD (Metallorganische Chemische Dampfabscheidung) und MBE (Molekularstrahlepitaxie) realisiert werden. Wenn MOCVD verwendet wird, kann das Quellengas Trimethylgallium (TMG), Trimethylaluminium (TMA) oder NH_3 (Ammoniak) sein. Das Trägergas kann ein Stickstoff- oder Wasserstoffgas sein. Die Reaktionstemperatur kann im Bereich von 400°C bis 1300°C gewählt werden.

[0042] Wenn Kohlenstoffatome als Fremdatome verwendet werden, kann die Konzentration der Kohlenstoffatome durch Einstellen mindestens eines Parameters des Verhältnisses zwischen dem Quellengas der Gruppe III und dem Quellengas der Gruppe V, der Reaktionstemperatur und des Reaktionsdrucks gesteuert werden. Mit der Maßgabe, dass die anderen Bedingungen gleich sind, nimmt die Konzentration der Kohlenstoffatome ab, wenn die Reaktionstemperatur steigt und nimmt zu, wenn das Verhältnis des Quellengases der Gruppe V zu dem Quellengas der Gruppe **111** abnimmt. Außerdem steigt die Konzentration der Kohlenstoffatome, wenn der Reaktionsdruck abnimmt. Die Konzentration der Kohlenstoffatome kann zum Beispiel durch SIMS (sekundäre Ionenmassenspektrometrie) bestimmt werden.

[0043] Abhängig von der Zusammensetzung und der Dicke der Nitrid-Halbleiterkristallschicht **140** können ein oder mehrere Parameter, ausgewählt aus (i) der Zusammensetzung jeder der ersten bis vierten Schicht **112** bis **134**, (ii) der Dicke jeder der ersten bis vierten Schicht **112** bis **134**, (iii) der Zahl n der Einheitsschichten, die in der ersten Übergitterschicht **110** enthalten sind, und (iv) der Zahl m der Einheitsschichten, die in der zweiten Übergitterschicht **130** enthalten sind, so angepasst werden, dass der Verzug des Halbleiterwafers **100**, gemessen an der Oberfläche der Nitrid-Halbleiterkristallschicht **140** 50 µm oder weniger beträgt. Abhängig von der Zusammensetzung und der Dicke der Nitrid-Halbleiterkristallschicht **140**, können die Zahl n der Einheitsschichten, die in der ersten Übergitterschicht **110** enthalten sind, und die Zahl m der Einheitsschichten, die in der zweiten Übergitterschicht **130** enthalten sind, so eingestellt werden, dass der Verzug des Halbleiterwafers **100**, gemessen an der Oberfläche der Nitrid-Halbleiterkristallschicht **140** 50 µm oder weniger beträgt.

(Erste praktische Ausführung)

[0044] Ein 10,4 cm (4 inch) Si-Wafer (mit einer Dicke von 625 µm, p-dotiert) mit der Ebenenorientierung (111) wurde als der Trägerwafer **102** verwendet, und eine AlN Schicht mit einer Dicke von 150 nm wurde auf dem Si-Wafer als die Pufferschicht **104** gebildet. Auf dieser AlN Schicht wurde eine AlN Schicht mit einer Dicke von 5 nm als die erste Schicht **112** gebildet, und eine $Al_{0,15}Ga_{0,85}N$ Schicht mit einer Dicke von 16 nm wurde als die zweite Schicht **114** gebil-

det. Die AlN Schicht mit einer Dicke von 5 nm und die $Al_{0,15}Ga_{0,85}N$ Schicht bilden die erste Einheitsschicht **116**. Hier wurden 75 erste Einheitsschichten gebildet, um die erste Übergitterschicht **110** bereitzustellen. Danach wurde eine AlN Schicht mit einer Dicke von 70 nm als die Verbindungsschicht **120** gebildet. Außerdem wurde eine AlN Schicht mit einer Dicke von 5 nm als die dritte Schicht **132** gebildet, und eine $Al_{0,1}Ga_{0,9}N$ Schicht mit einer Dicke von 16 nm wurde als die vierte Schicht **134** gebildet. Die AlN Schicht mit einer Dicke von 5 nm und die $Al_{0,1}Ga_{0,9}N$ stellen die zweite Einheitsschicht **136** bereit. Hier wurden 75 zweite Einheitsschichten **136** gebildet, um die zweite Übergitterschicht **130** bereitzustellen. Danach wurde eine GaN Schicht mit einer Dicke von 800 nm als eine Grundschicht der Vorrichtung **142** gebildet, und eine $Al_{0,2}Ga_{0,8}N$ Schicht mit einer Dicke von 20 nm wurde als die aktive Schicht **144** gebildet. Es ist anzumerken, dass mehrere Arten von Halbleiterwafern **100** hergestellt wurden, wobei die Reaktionstemperatur während der Bildung der ersten Übergitterschicht **110** auf verschiedene Werte eingestellt wurde. Auf diese Weise wurden mehrere Halbleiterwafer **100**, die fünf unterschiedliche Niveaus der Konzentration der Kohlenstoffatome aufweisen, d. h. 1×10^{18}, 5×10^{18}, 7×10^{18}, 1×10^{19} und 6×10^{19} (in cm^{-3}) hergestellt. Die mittlere Gitterkonstante der ersten Übergitterschicht **110** beträgt 0,316187 nm, und die mittlere Gitterkonstante der zweiten Übergitterschicht **130** beträgt 0, 316480 nm. Die mittlere Gitterkonstante der Verbindungsschicht **120** beträgt 0,311200 nm.

(Vergleichsbeispiele)

[0045] Um sie mit den Ausführungen zu vergleichen, wurde das folgende erste bis dritte Vergleichsbeispiel hergestellt.

[0046] [Erstes Vergleichsbeispiel]: Die Verbindungsschicht **120** wurde nicht bereitgestellt, das Al Verhältnis der vierten Schicht **134** wurde auf 0,15 eingestellt, so dass die mittlere Gitterkonstante der ersten Übergitterschicht **110** so eingestellt wurde, dass sie gleich zur mittleren Gitterkonstante der zweiten Übergitterschicht **130** ist, und die anderen Eigenschaften waren die gleichen wie die bei der ersten Ausführung.

[0047] [Zweites Vergleichsbeispiel]: Das Al Verhältnis der vierten Schicht **134** wurde auf 0,15 eingestellt, so dass die mittlere Gitterkonstante der ersten Übergitterschicht **110** so eingestellt wurde, dass sie gleich zur mittleren Gitterkonstante der zweiten Übergitterschicht **130** ist, und die andere Eigenschaften waren die gleichen wie bei der ersten Ausführung.

[0048] [Drittes Vergleichsbeispiel]: Die Verbindungsschicht **120** wurde nicht bereitgestellt, und die anderen Eigenschaften waren die gleichen wie bei der ersten Ausführung.

[0049] **Fig.** 2 ist eine Grafik, die den Umfang des Verzugs und die Durchschlagspannung in Bezug auf die Konzentration der Kohlenstoffatome für die Halbleiterwafer der ersten Ausführung zeigt. **Fig.** 3 ist eine Grafik, die den Umfang des Verzugs und die Durchschlagspannung in Bezug auf die Konzentration der Kohlenstoffatome für die Halbleiterwafer des ersten Vergleichsbeispiels zeigt. **Fig.** 4 ist eine Grafik, die den Umfang des Verzugs und die Durchschlagspannung in Bezug auf die Konzentration der Kohlenstoffatome für die Halbleiterwafer des zweiten Vergleichsbeispiels zeigt. **Fig.** 5 ist eine Grafik, die den Umfang des Verzugs und die Durchschlagspannung in Bezug auf die Konzentration der Kohlenstoffatome für den Halbleiterwafer des dritten Vergleichsbeispiels zeigt. Die Konzentration der Kohlenstoffatome bedeutet die mittlere Konzentration, gemessen mit SIMS Tiefenanalyse. Der Umfang des Verzugs wurde durch Messen der Höhe der jeweiligen Teile des Wafers mit Laserlicht beurteilt. Es ist anzumerken, dass der Verzug einen positiven Wert annimmt, wenn er in der Richtung gemessen wird, in dem der Mittelteil des Wafers höher als der Kantenteil des Wafers ist. Um die Durchschlagspannung zu bestimmen, wurden der Strom und die Spannung zwischen der ohmschen Elektrode mit 250 µm × 200 µm, gebildet auf der aktiven Schicht **144**, und der ohmschen Elektrode, gebildet auf der gesamten rückseitigen Ebene des Trägerwafers **102** gemessen. Hier wurde die Durchschlagspannung als die Spannung definiert, die angelegt ist, wenn der Strom 1 $\mu A/mm^2$ übersteigt.

[0050] Die in den **Fig.** 2 bis **Fig.** 5 gezeigten Ergebnisse geben an, dass die Durchschlagspannung auf etwa 700 V in dem Bereich ansteigt, in dem die Konzentration der Kohlenstoffatome 5×10^{18} (cm^{-3}) übersteigt. In dem ersten bis dritten Vergleichsbeispiel übersteigt jedoch der Umfang des Verzugs in dem Bereich, in dem die Konzentration der Kohlenstoffatome hoch ist, 100 µm. In der ersten Ausführung bleibt andererseits der Umfang des Verzugs etwa 40 µm oder weniger, auch wenn die Konzentration der Kohlenstoffatome hoch ist. So kann der Umfang des Verzugs klein gehalten werden. Anzumerken ist, dass in dem Bereich, in dem die Konzentration der Kohlenstoffatome niedrig ist und 5×10^{18} (cm^{-3}) oder weniger beträgt, das zweite und dritte Vergleichsbeispiel auch den Umfang des Verzugs in einem ähnlichen Ausmaß gering halten wie die erste Ausführung. Es wird angenommen, dass das durch die Wirkung der Verbindungsschicht **120** (das zweite Vergleichsbeispiel) und die Wirkung des Unterschieds in der mittleren Gitterkonstante zwischen der ersten Übergitterschicht **110** und der zweiten Übergitterschicht **130** (das dritte Vergleichsbeispiel) erreicht wird. Jedoch sind die vorteilhaften Wirkungen, die durch das zweite und dritte Vergleichsbeispiel erreicht werden, auf den Bereich beschränkt, in dem die Konzentration der Kohlenstoffatome niedrig sind, und gehen in

dem Bereich verloren, in dem die Konzentration der Kohlenstoffatome hoch ist.

(Zweite Ausführung)

[0051] Gemäß einer zweiten Ausführung wurde ein Halbleiterwafer auf gleiche Weise wie in der ersten Ausführung hergestellt, außer dass die Zusammensetzung der Verbindungsschicht **120** kontinuierlich in der Dickerichtung von der ersten Übergitterschicht **110** zu der zweiten Übergitterschicht **130** von AlN zu $Al_{0,3}Ga_{0,7}N$ variiert wird. Hier wurde die Konzentration der Kohlenstoffatome auf zwei unterschiedliche Niveaus von 1×10^{19} und 6×10^{19} (in cm^{-3}) eingestellt. **Fig.** 6 ist eine Grafik, die den Umfang des Verzugs und die Durchschlagspannung in Bezug auf die Konzentration der Kohlenstoffatome für die Halbleiterwafer der zweiten Ausführung zeigt. **Fig.** 7 wird bereitgestellt, um leicht den Vergleich zwischen der ersten und zweiten Ausführung nachzuvollziehen. **Fig.** 7 ist eine Grafik die den Umfang des Verzugs in Bezug auf die Konzentration der Kohlenstoffatome für die Halbleiterwafer der ersten und zweiten Ausführung (I1 und I2) und des ersten bis dritten Vergleichsbeispiels (CE1, CE2 und CE3) zeigt. Die Ergebnisse in **Fig.** 7 geben an, dass der Umfang des Verzugs für die Halbleiterwafer der zweiten Ausführung nicht nur geringer als der Umfang des Verzugs für die Halbleiterwafer des ersten bis dritten Vergleichsbeispiels angepasst ist, sondern auch als der Umfang des Verzugs für die Halbleiterwafer der ersten Ausführung.

(Dritte Ausführung)

[0052] In einer dritten Ausführung wurden veranschaulichende Halbleiterwafer hergestellt, wobei die Zahlen n und m auf verschiedene Werte eingestellt wurden, wobei die Zahl n die Zahl der ersten Einheitsschichten **116** in der Übergitterschicht **110** bezeichnet und die Zahl m die Zahl der zweiten Einheitsschichten **136** in der zweiten Übergitterschicht **130** bezeichnet. Die Halbleiterwafer wurden auf gleiche Weise wie in der ersten Ausführung hergestellt, außer dass die Konzentration der Kohlenstoffatome auf 1×10^{19} (cm^{-3}) festgelegt wurde und die Zahlen m und n auf verschiedene Werte eingestellt wurden. Die Zahlen n und m wurden auf drei unterschiedliche Werte von n/m = 75/75, 100/50 und 1/149 eingestellt. **Fig.** 8 ist eine Grafik, die den Umfang des Verzugs und die Durchschlagspannung für die Halbleiterwafer der dritten Ausführung zeigt. Die in **Fig.** 8 gezeigten Ergebnisse zeigen, dass der Umfang des Verzugs durch Variieren der Zahlen n und m gesteuert werden kann.

(Vierte Ausführung)

[0053] Bei Halbleiterwafern einer vierten Ausführung wurde ein blauer Korundwafer als der Trägerwafer **102** verwendet. Die Halbleiterwafer wurden auf gleiche Weise wie bei der ersten Ausführung hergestellt, außer dass ein blauer Korundwafer als der Trägerwafer **102** verwendet wurde, die Konzentration der Kohlenstoffatome auf 1×10^{19} (cm^{-3}) eingestellt wurde und die Zahlen n und m auf verschiedene Niveaus eingestellt wurden. Die Zahlen n und m wurden auf zwei unterschiedliche Niveaus von n/m = 75/75 und 50/100 eingestellt. **Fig.** 9 ist eine Grafik, die den Umfang des Verzugs für die Halbleiterwafer der vierten Ausführung zeigt. Die in **Fig.** 9 gezeigten Ergebnisse zeigen, dass der Umfang des Verzugs durch Variieren der Zahlen n und m der in die erste Gitterschicht **110** und die zweite Übergitterschicht **130** enthaltenen Einheitsschichten gesteuert werden kann, auch wenn der Trägerwafer **102** ein blauer Korundwafer ist.

(Fünfte Ausführung)

[0054] In einer fünften Ausführung wurden veranschaulichende Halbleiterwafer hergestellt, wobei der Al Verhältnis der Alga Schicht, die die vierte Schicht **134** ist, im Bereich von 0,15 bis 0,10 variiert wurde. Die fünfte Ausführung ist wie bei der ersten Ausführung, außer dass die Konzentration der Kohlenstoffatome auf 1×10^{19} (cm^{-3}) festgelegt wurde. Das Al Verhältnis wurde auf sechs verschiedene Niveaus von 0,15, 0,14, 0,13, 0,12, 0,11 und 0,10 festgelegt. Wenn das Al Verhältnis auf die Niveaus 0,10 bzw. 0,15 festgelegt wurde, die einem der Fälle der ersten Ausführung und einem der Fälle des zweiten Vergleichsbeispiels, bei dem die Konzentration der Kohlenstoffatome 1×10^{19} (cm^{-3}) war, entsprachen. So wurden die Halbleiterwafer der ersten Ausführung bzw. des zweiten Vergleichsbeispiels, für die die Konzentration der Kohlenstoffatome auf 1×10^{19} (cm^{-3}) festgelegt war, als die Halbleiterwafer der fünften Ausführung verwendet, für die das Al Verhältnis auf die Niveaus 0,10 und 0,15 festgelegt wurde. Wenn das Al Verhältnis auf 0,15, 0,14, 0,13, 0,12, 0,11 und 0,10 festgelegt wird, nimmt die mittlere Gitterkonstante der zweiten Übergitterschicht **130** Werte von 0,316187, 0,316245, 0,316304, 0,316363, 0,316421 und 0,316480 (in nm) an. Da die mittlere Gitterkonstante der ersten Übergitterschicht **110** 0,316187 nm beträgt, beträgt der Unterschied in der mittleren Gitterkonstante (die mittlere Gitterkonstante der zweiten Überschicht **130** – die mittlere Gitterkonstante der ersten Überschicht **110**) 0,000000, 0,000059, 0, 000117, 0,000176, 0,000235 und 0,000293 (in nm), wenn das Al Verhältnis auf 0,15, 0,14, 0,13, 0,12, 0, 11 und 0,10 eingestellt wird.

[0055] **Fig.** 10 ist eine Grafik, die den Umfang des Verzugs in Bezug auf den Unterschied in der mittleren Gitterkonstante für die Halbleiterwafer der fünften Ausführung zeigt. Die in **Fig.** 10 gezeigten Ergebnisse zeigen, dass der Umfang des Verzugs abnimmt, wenn der Unterschied der mittleren Gitterkonstante zunimmt. Die Ergebnis zeigen auch, dass wenn die mittlere Gitterkonstante der zweiten Überschicht

130 nur leicht größer als die mittlere Gitterkonstante der ersten Übergitterschicht **110** wird (wenn der Unterschied in der mittleren Gitterkonstante größer wird), der Umfang des Verzugs sich ändert und die Änderung im Wert des Umfangs des Verzugs empfindlich gegenüber der Änderung im Unterschied der mittleren Gitterkonstante ist. Das zeigt, dass der vorstehend beschriebene Mechanismus, der ermöglicht, dass der Umfang des Verzugs des Halbleiterswafers ungeachtet der Einführung einer hohen Konzentration an Fremdatomen verringert werden kann, effektiv zur Steuerung des Umfangs des Verzugs als ein Ergebnis ausreichender gegenseitiger Übertragung der Spannung zwischen der ersten Übergitterschicht **110** und der zweiten Übergitterschicht **130** funktioniert.

[0056] Bei Vergleich der Zunahme des Unterschieds in der mittleren Gitterkonstante neigt die Abnahme des Umfangs des Verzugs dazu, gesättigt zu sein, nachdem der Unterschied in der mittleren Gitterkonstante im Wesentlichen 0,00017 nm übersteigt. Das zeigt möglicherweise eine solche Neigung, dass die Spannung als ein Ergebnis der Zunahme des Unterschieds in der mittleren Gitterkonstante und der Gitterrelaxation folglich an den Kristallgrenzflächen zuzunehmen beginnt. Die Zunahme der Gitterrelaxation ergibt eine Absorption der Spannung, die die Steuerbarkeit des Umfangs des Verzugs vermindert. Demgemäß wird angenommen, dass eine Obergrenze auf den Bereich des Unterschieds in der mittleren Gitterkonstante gelegt wird, um die Steuerbarkeit des Umfangs des Verzugs sicherzustellen. Es ist anzumerken, dass die Tatsachen, dass der Umfang des Verzugs durch Einstellen des Unterschieds in der mittleren Gitterkonstante genau gesteuert werden kann, und dass die Abnahme im Umfang des Verzugs zur Sättigung neigt, wenn der Unterschied der mittleren Gitterkonstante groß wird, mit dem früher bestimmten Mechanismus übereinstimmen und auf die Wirksamkeit des Mechanismus unter anderen Tatsachen geschlossen wird.

Erklärung der Bezugszeichen

100 ... Halbleiterwafer, **102** ... Trägerschicht, **104** ... Pufferschicht, **110** ... erste Übergitterschicht, **112** ... erste Schicht, **114** ... zweite Schicht, **116** ... erste Einheitsschicht, **120** ... Verbindungsschicht, **130** ... zweite Übergitterschicht, **132** ... dritte Schicht, **134** ... vierte Schicht, **136** ... zweite Einheitsschicht, **140** ... Nitrid-Halbleiterkristallschicht, **142** ... Grundschicht der Vorrichtung, **144** ... aktive Schicht

Patentansprüche

1. Ein Halbleiterwafer, umfassend einen Trägerwafer, eine erste Übergitterschicht, eine Verbindungsschicht, eine zweite Übergitterschicht und eine Nitrid-Halbleiterkristallschicht, wobei
der Trägerwafer, die erste Übergitterschicht, die Verbindungsschicht, die zweite Übergitterschicht und die Nitrid-Halbleiterkristallschicht in einer Reihenfolge des Trägerwafers, der ersten Übergitterschicht, der Verbindungsschicht, der zweiten Übergitterschicht und der Nitrid-Halbleiterkristallschicht angeordnet sind,
die erste Übergitterschicht eine Mehrzahl von ersten Einheitsschichten beinhaltet, von denen jede aus einer ersten Schicht und einer zweiten Schicht aufgebaut ist,
die zweite Übergitterschicht eine Mehrzahl von zweiten Einheitsschichten beinhaltet, von denen jede aus einer dritten Schicht und einer vierten Schicht aufgebaut ist,
die erste Schicht aus $Al_{x1}Ga_{1-x1}N$ ($0 < x1 \leq 1$) gebildet ist,
die zweite Schicht aus $Al_{y1}Ga_{1-y1}N$ ($0 \leq y1 < 1$, $x1 > y1$) gebildet ist,
die dritte Schicht aus $Al_{x2}Ga_{1-x2}N$ ($0 < x2 \leq 1$) besteht,
die vierte Schicht aus $Al_{y2}Ga_{1-y2}N$ ($0 \leq y2 < 1$, $x2 > y2$) besteht,
eine mittlere Gitterkonstante der ersten Übergitterschicht sich von einer mittleren Gitterkonstante der zweiten Übergitterschicht unterscheidet,
eine oder mehrere Schichten, ausgewählt aus der ersten Übergitterschicht und der zweiten Übergitterschicht, Fremdatome enthalten, die eine Durchschlagspannung verbessern und die eine Konzentration von mehr als 7×10^{18} [Atome/cm^3] aufweisen.

2. Der Halbleiterwafer nach Anspruch 1, wobei die Fremdatome eine oder mehrere Arten, ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus C-Atomen, Fe-Atomen, Mn-Atomen, Mg-Atomen, V-Atomen, Cr-Atomen, Be-Atomen und B-Atomen, sind.

3. Der Halbleiterwafer nach Anspruch 2, wobei die Fremdatome C-Atome oder Fe-Atome sind.

4. Der Halbleiterwafer nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei die Verbindungsschicht eine Kristallschicht ist, die mit der ersten Übergitterschicht und der zweiten Übergitterschicht in Kontakt ist.

5. Der Halbleiterwafer nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei eine Zusammensetzung der Verbindungsschicht sich kontinuierlich in einer Dickerichtung der Verbindungsschicht von der ersten Übergitterschicht zu der zweiten Übergitterschicht ändert.

6. Der Halbleiterwafer nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei eine Zusammensetzung der Verbindungsschicht sich stufenweise in einer Dickerichtung der Verbindungsschicht von der ersten Übergitterschicht zu der zweiten Übergitterschicht ändert.

7. Der Halbleiterwafer nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei die Verbindungsschicht aus $Al_zGa_{1-z}N$ ($0 \leq z \leq 1$) gebildet ist.

8. Der Halbleiterwafer nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei eine Dicke der Verbindungsschicht größer ist als eine Dicke jeder ersten Schicht, zweiten Schicht, dritten Schicht und vierten Schicht.

9. Der Halbleiterwafer nach einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei eine mittlere Gitterkonstante der Verbindungsschicht kleiner ist als eine mittlere Gitterkonstante jeder ersten Übergitterschicht und zweiten Übergitterschicht.

10. Der Halbleiterwafer nach einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei die erste Übergitterschicht 1 bis 200 erste Einheitsschichten beinhaltet, von denen jede aus der ersten Schicht und der zweiten Schicht aufgebaut ist.

11. Der Halbleiterwafer nach einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei die zweite Übergitterschicht 1 bis 200 zweite Einheitsschichten beinhaltet, von denen jede aus der dritten Schicht und der vierten Schicht aufgebaut ist.

12. Ein Verfahren zur Herstellung des Halbleiterwafers nach einem der Ansprüche 1 bis 11, wobei das Verfahren umfasst:
n-faches Bilden der ersten Übergitterschicht durch Bilden der ersten Einheitsschicht, welche aus der ersten Schicht und der zweiten Schicht aufgebaut ist,
Bilden der Verbindungsschicht;
m-faches Bilden der zweiten Übergitterschicht durch Bilden der zweiten Einheitsschicht, welche aus der dritten Schicht und der vierten Schicht aufgebaut ist; und
Bilden der Nitrid-Halbleiterkristallschicht, wobei
während des einen oder mehrfachen Bildens, ausgewählt aus dem Bilden der ersten Übergitterschicht und dem Bilden der zweiten Übergitterschicht, die eine oder mehrere aus der ersten Übergitterschicht und der zweiten Übergitterschicht so gebildet werden, dass sie Fremdatome enthalten, die eine Durchschlagspannung der einen oder mehreren aus der ersten Übergitterschicht und der zweiten Übergitterschicht verbessern und die eine Konzentration von mehr als 7×10^{18} [Atome/cm^3] aufweisen.

13. Das Verfahren nach Anspruch 12, wobei je nach einer Zusammensetzung und einer Dicke der Nitrid-Halbleiterkristallschicht, ein oder mehrere Parameter, ausgewählt aus (i) einer Zusammensetzung jeder ersten bis vierten Schicht, (ii) eine Dicke jeder ersten bis vierten Schicht, (iii) die Zahl n der in der ersten Übergitterschicht enthaltenen Einheitsschichten und (iv) die Zahl m der in der zweiten Übergitterschicht enthaltenen Einheitsschichten so eingestellt werden, dass der Verzug des Halbleiterwafers, gemessen an einer Oberfläche der Nitrid-Halbleiterkristallschicht, 50 µm oder weniger beträgt.

14. Das Verfahren nach Anspruch 13, wobei je nach der Zusammensetzung und der Dicke der Nitrid-Halbleiterkristallschicht, die Zahl n der in der ersten Übergitterschicht enthaltenen Einheitsschichten und die Zahl m der in der zweiten Übergitterschicht enthaltenen Einheitsschichten so eingestellt werden, dass der Verzug des Halbleiterwafers, gemessen an der Oberfläche der Nitrid-Halbleiterkristallschicht, 50 µm oder weniger beträgt.

Es folgen 10 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

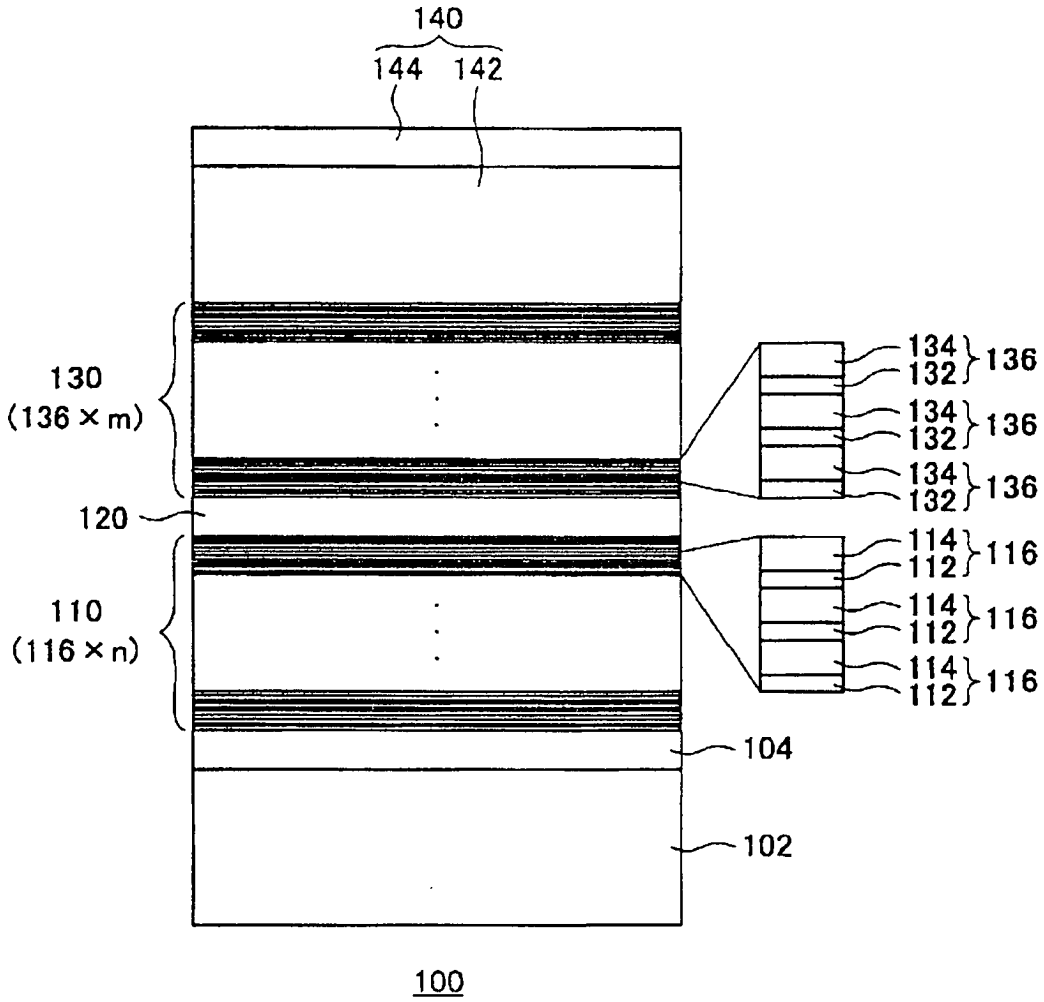


FIG. 1

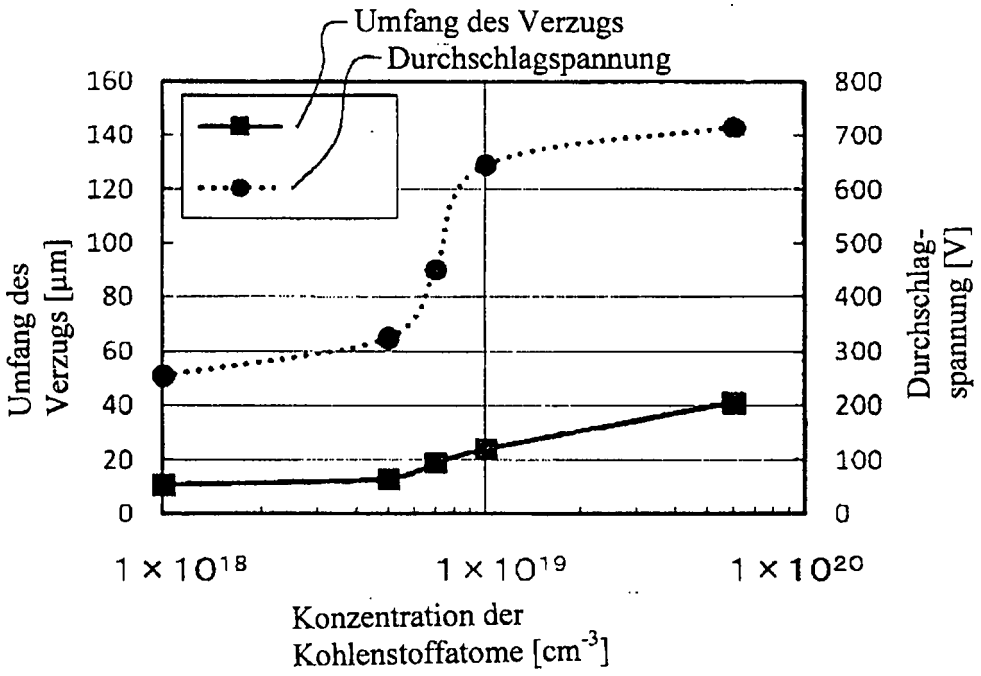

Umfang des Verzugs
Durchschlagspannung
160
140
120
100
80
60
40
20
0
Umfang des Verzugs [µm]
800
700
600
500
400
300
200
100
0
Durchschlag-spannung [V]
1 × 10^18
1 × 10^19
1 × 10^20
Konzentration der Kohlenstoffatome [cm^-3]

FIG. 2

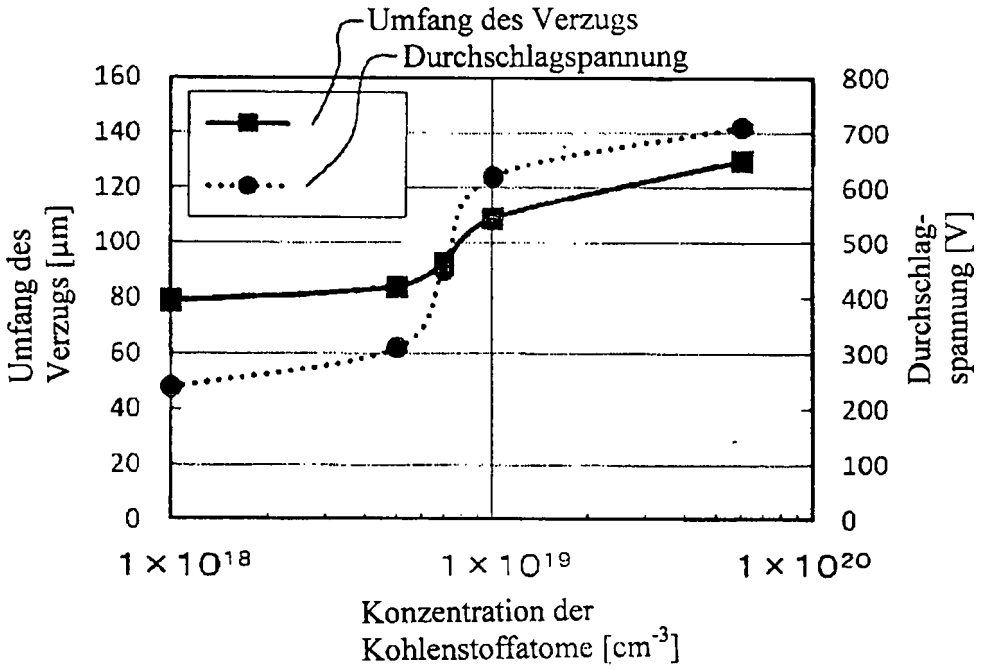

Umfang des Verzugs
Durchschlagspannung
160
140
120
100
80
60
40
20
0
Umfang des Verzugs [µm]
800
700
600
500
400
300
200
100
0
Durchschlag-spannung [V]
1×10¹⁸
1×10¹⁹
1×10²⁰
Konzentration der Kohlenstoffatome [cm⁻³]

FIG. 3

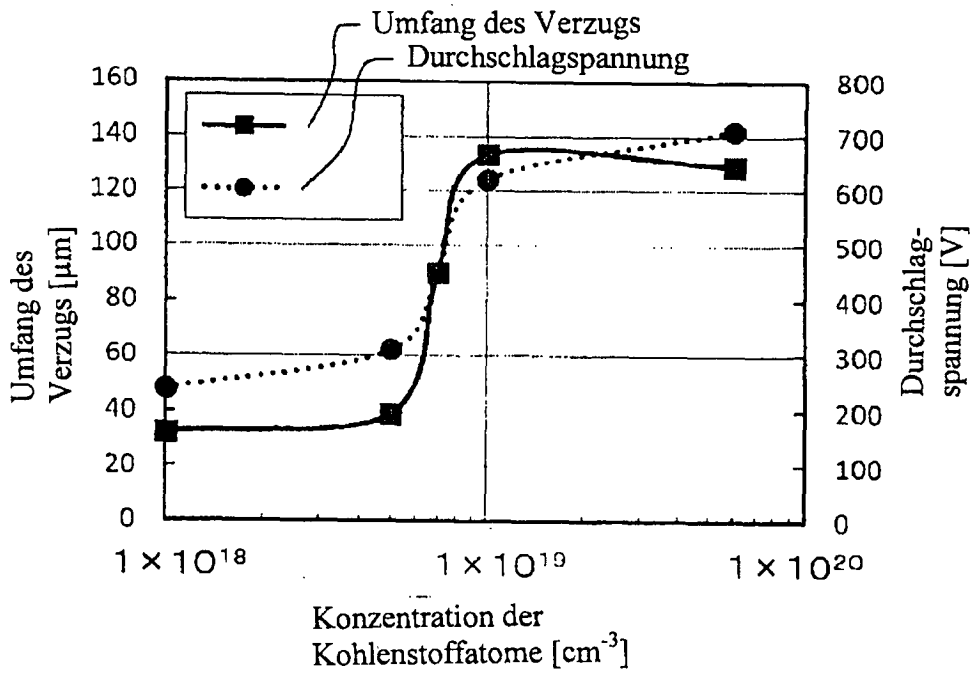

Umfang des Verzugs
Durchschlagspannung
160
140
120
100
80
60
40
20
0
Umfang des Verzugs [µm]
800
700
600
500
400
300
200
100
0
Durchschlag-spannung [V]
1×10¹⁸
1×10¹⁹
1×10²⁰
Konzentration der Kohlenstoffatome [cm⁻³]

FIG. 4

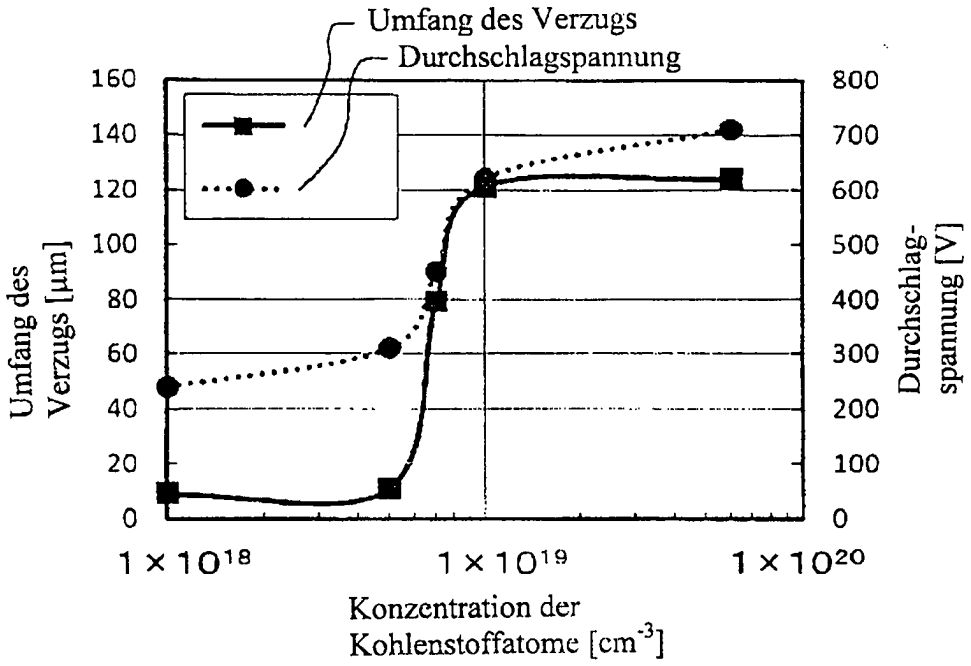

Umfang des Verzugs
Durchschlagspannung
160
140
120
100
80
60
40
20
0
Umfang des Verzugs [µm]
800
700
600
500
400
300
200
100
0
Durchschlag-spannung [V]
1×10¹⁸
1×10¹⁹
1×10²⁰
Konzentration der Kohlenstoffatome [cm⁻³]

FIG. 5

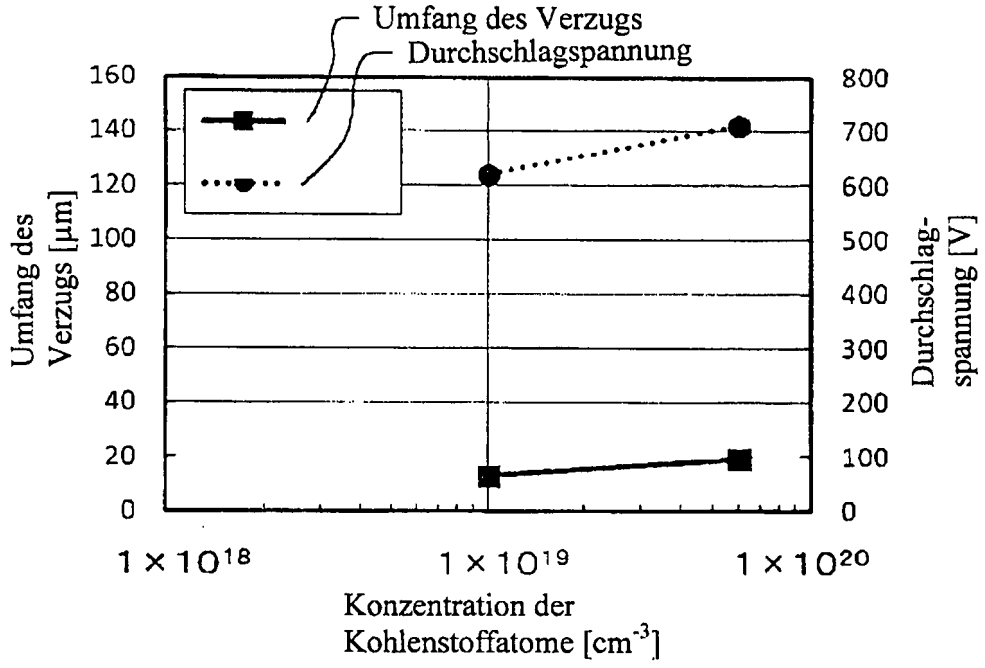

Umfang des Verzugs
Durchschlagspannung
160
140
120
100
80
60
40
20
0
Umfang des Verzugs [µm]
800
700
600
500
400
300
200
100
0
Durchschlag-spannung [V]
1×10^18
1×10^19
1×10^20
Konzentration der Kohlenstoffatome [cm^-3]

FIG. 6

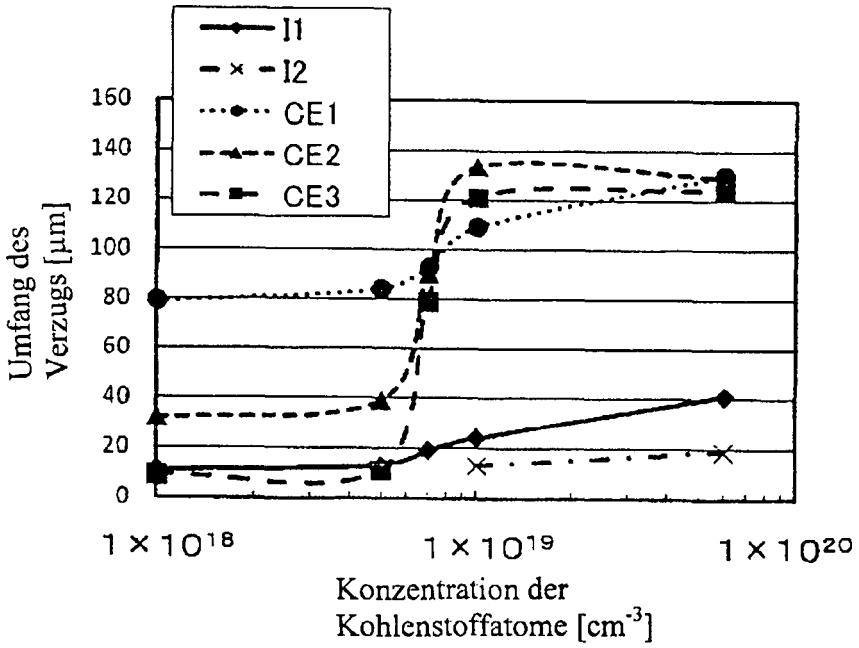

I1
I2
CE1
CE2
CE3
160
140
120
100
80
60
40
20
0
Umfang des Verzugs [µm]
1×10¹⁸
1×10¹⁹
1×10²⁰
Konzentration der Kohlenstoffatome [cm⁻³]

FIG. 7

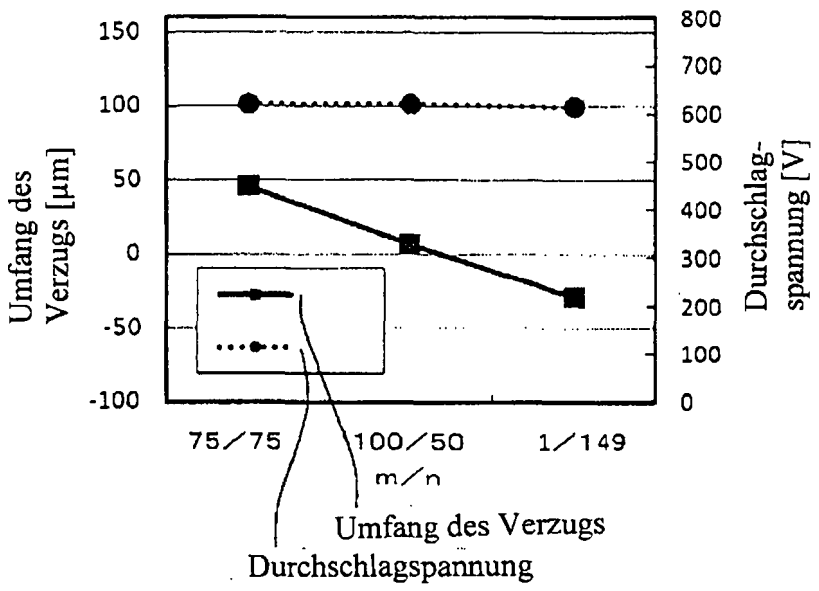

150
100
50
0
-50
-100
Umfang des Verzugs [µm]
800
700
600
500
400
300
200
100
0
Durchschlag-spannung [V]
75/75
100/50
1/149
m/n
Umfang des Verzugs
Durchschlagspannung

FIG. 8

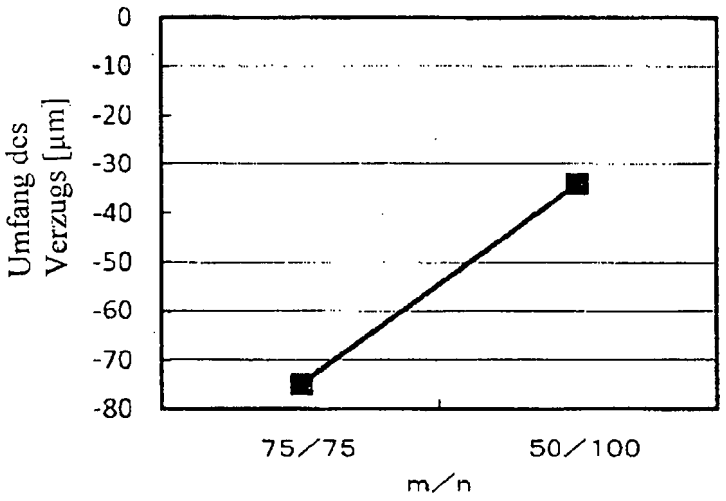


FIG. 9

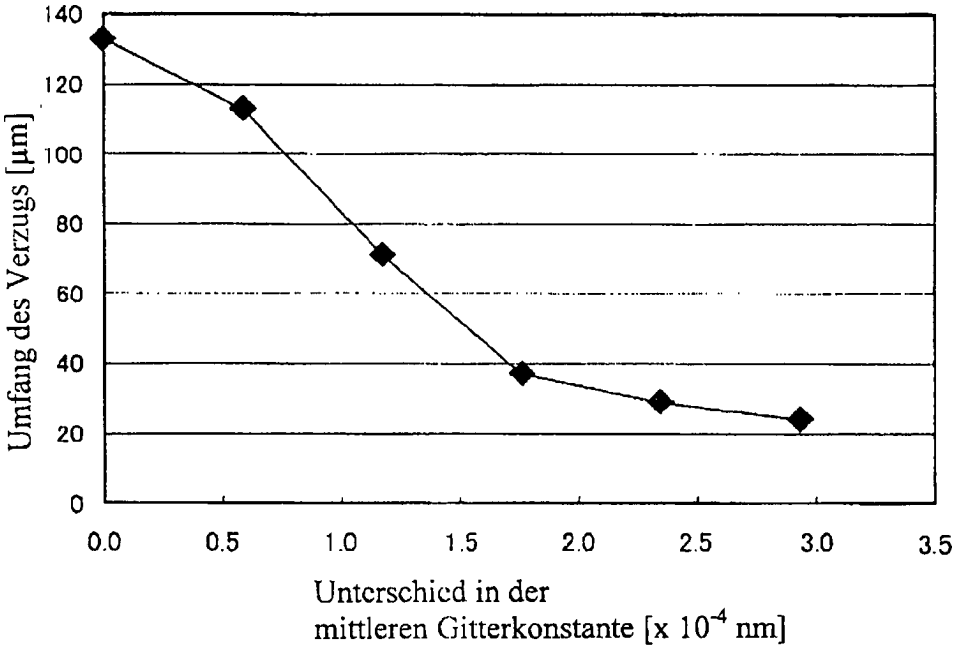

140
120
100
80
60
40
20
0
Umfang des Verzugs [µm]
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
3.5
Unterschied in der
mittleren Gitterkonstante [x 10-4 nm]

FIG. 10