



(10) **DE 10 2014 116 666 B4** 2022.04.21

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2014 116 666.3**
(22) Anmeldetag: **14.11.2014**
(43) Offenlegungstag: **19.05.2016**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **21.04.2022**

(51) Int Cl.: **H01L 21/265** (2006.01)
H01L 29/73 (2006.01)
H01L 21/331 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(62) Teilung in:
10 2014 020 098.1

(73) Patentinhaber:
Infineon Technologies AG, 85579 Neubiberg, DE

(74) Vertreter:
**2SPL Patentanwälte PartG mbB Schuler Schacht
Platzer Lehmann, 81373 München, DE**

(72) Erfinder:
**Schulze, Hans-Joachim, Dr., 82024 Taufkirchen,
DE; Laven, Johannes Georg, 82024 Taufkirchen,
DE; Jelinek, Moriz, Villach, AT; Oefner, Helmut,
Dr., 85604 Zorneding, DE; Schustereder, Werner,
Dr., Villach, AT**

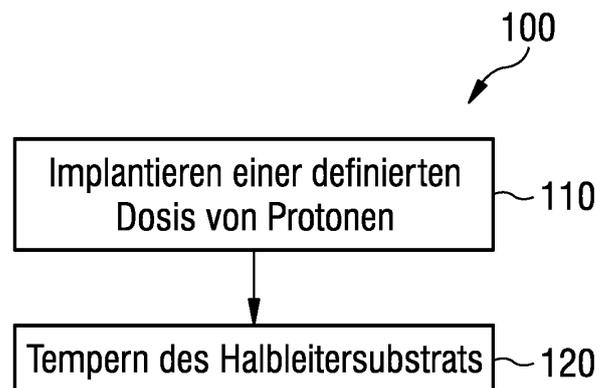
(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	10 2011 003 439	A1
US	2011 / 0 124 160	A1
WO	2013/ 026 706	A1
JP	2006- 69 852	A

**Goesele, U. [u.a.]: Diffusion Engineering by
Carbon in Silicon. In: Mat. Res. Soc. Symp. Vol.
610, 2000, 1 - 12.**

(54) Bezeichnung: **Ein Verfahren zum Bilden eines Halbleiterbauelements**

(57) Hauptanspruch: Ein Verfahren (100) zum Bilden eines Halbleiterbauelements, das Verfahren umfassend:
Implantieren (110) einer definierten Dosis von Protonen in ein Halbleitersubstrat, wobei das Implantieren (110) der definierten Dosis von Protonen in das Halbleitersubstrat das Implantieren einer definierten Dosis von Protonen in eine Driftschichtregion des zu bildenden Halbleiterbauelements aufweist; und
Tempern (120) des Halbleitersubstrats gemäß einem definierten Temperaturprofil, wobei zumindest eines der definierten Dosis von Protonen und des definierten Temperaturprofils abhängig von einem Kohlenstoff-bezogenen Parameter ausgewählt wird, der Informationen über eine Kohlenstoffkonzentration innerhalb von zumindest einem Teil des Halbleitersubstrats angibt.



Beschreibung

TECHNISCHES GEBIET

[0001] Ausführungsbeispiele beziehen sich auf Halbleiterherstellungstechniken und insbesondere auf ein Verfahren zum Bilden eines Halbleiterbauelements und auf ein Halbleiterbauelement.

HINTERGRUND

[0002] Viele Halbleiterbauelemente umfassen Halbleitersubstrate mit Regionen unterschiedlicher Leitfähigkeitstypen und unterschiedlicher Dotierungskonzentrationen. Die Implementierung von Halbleitersubstraten mit unterschiedlichen Dotierungsregionen ist häufig eine Herausforderung. Eine Möglichkeit zum Erzeugen von Donatoren innerhalb eines Halbleiters ist eine Implantation von Protonen, um Wasserstoff-induzierte Donatoren zu erzeugen. Es ist wünschenswert, die Dotierungseffizienz von Donatoren zu erhöhen, verursacht durch eine Protonenimplantation.

[0003] Die Druckschrift WO 2013/ 026 706 A1 beschreibt ein Herstellungsverfahren für ein optoelektronisches Bauteil und das Dokument „Goesele, U. [u.a.]: Diffusion Engineering by Carbon in Silicon. In: Mat. Res. Soc. Symp. Vol. 610, 2000, 1 - 12.“ beschreibt das Diffusionsverhalten von Kohlenstoff in Silizium.

ZUSAMMENFASSUNG

[0004] Einige Ausführungsbeispiele beziehen sich auf ein Verfahren zum Bilden eines Halbleiterbauelements. Das Verfahren umfasst das Implantieren einer definierten Dosis von Protonen in ein Halbleitersubstrat und das Tempern des Halbleitersubstrats gemäß einem definierten Temperaturprofil. Zumindest eines der definierten Dosis von Protonen und des definierten Temperaturprofils wird abhängig von einem Kohlenstoff-bezogenen Parameter ausgewählt, der Informationen über eine Kohlenstoffkonzentration innerhalb von zumindest einem Teil des Halbleitersubstrats anzeigt.

[0005] Einige weitere Ausführungsbeispiele beziehen sich auf ein Halbleiterbauelement, das zumindest eine Transistorstruktur aufweist. Die Transistorstruktur umfasst einen Emitter- oder Source-Anschluss und einen Kollektor- oder Drain-Anschluss. Ferner variiert eine Kohlenstoffkonzentration innerhalb einer Halbleitersubstratregion, die zwischen dem Emitter- oder Source-Anschluss und dem Kollektor- oder Drain-Anschluss angeordnet ist, zwischen dem Emitter- oder Source-Anschluss und dem Kollektor- oder Drain-Anschluss.

[0006] Einige Ausführungsbeispiele beziehen sich auf ein Verfahren zum Bilden von Halbleiterbauelementen. Das Verfahren umfasst das Implantieren einer ersten definierten Dosis von Protonen in einen ersten Halbleiterwafer und das Tempern des ersten Halbleiterwafers gemäß einem ersten definierten Temperaturprofil. Zumindest eines der ersten definierten Dosis von Protonen und des ersten definierten Temperaturprofils wird abhängig von einem Kohlenstoff-bezogenen Parameter ausgewählt, der Informationen über eine erste Kunststoffkonzentration innerhalb von zumindest einem Teil des ersten Halbleiterwafers anzeigt. Ferner umfasst das Verfahren das Implantieren einer zweiten definierten Dosis von Protonen in einen zweiten Halbleiterwafer und das Tempern des zweiten Halbleiterwafers gemäß einem zweiten definierten Temperaturprofil. Zumindest eines der zweiten definierten Dosis von Protonen und des zweiten definierten Temperaturprofils wird abhängig von einem Kohlenstoff-bezogenen Parameter ausgewählt, der Informationen über eine zweite Kohlenstoffkonzentration innerhalb von zumindest einem Teil des zweiten Halbleiterwafers anzeigt. Die erste Kohlenstoffkonzentration unterscheidet sich von der zweiten Kohlenstoffkonzentration.

Figurenliste

[0007] Nachfolgend werden einige Ausführungsbeispiele von Vorrichtungen und/oder Verfahren abschließend beispielhaft und bezugnehmend auf die beiliegenden Zeichnungen beschrieben, in denen:

Fig. 1 ein Flussdiagramm eines Verfahrens zum Bilden eines Halbleiterbauelements zeigt;

Fig. 2 einen schematischen Querschnitt eines Halbleiterbauelements zeigt;

Fig. 3 einen schematischen Querschnitt einer Bipolartransistorstruktur mit isoliertem Gate zeigt;

Fig. 4 einen schematischen Querschnitt einer Mesa-Bipolartransistorstruktur mit isoliertem Gate zeigt;

Fig. 5 Feldstoppprofile mit entsprechenden Kohlenstoffverteilungen zeigt;

Fig. 6 ein Flussdiagramm eines Verfahrens zum Bilden eines Halbleiterbauelements zeigt;

Fig. 7 die Löslichkeit von Kohlenstoff in Silizium zeigt;

Fig. 8 den Diffusionskoeffizienten von Substitutionskohlenstoff Cs in Silizium zeigt; und

Fig. 9 den Diffusionskoeffizienten von Interstitialkohlenstoff Ci in Silizium zeigt.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG

[0008] Verschiedene Ausführungsbeispiele werden nun ausführlicher Bezug nehmend auf die beiliegenden Zeichnungen beschrieben, in denen einige Ausführungsbeispiele dargestellt sind. In den Figuren kann die Dicke der Linien, Schichten und/oder Regionen der Klarheit halber übertrieben sein.

[0009] Während dementsprechend verschiedene Abänderungen und alternative Formen von weiteren Ausführungsbeispielen möglich sind, werden Ausführungsbeispiele davon in den Zeichnungen beispielhaft gezeigt und hier ausführlich beschrieben. Es versteht sich jedoch, dass es nicht beabsichtigt ist, Ausführungsbeispiele auf die offenbaren bestimmten Formen zu begrenzen, sondern im Gegensatz die Ausführungsbeispiele alle in den Schutzbereich der Offenbarung fallenden Abänderungen, Entsprechungen und Alternativen abdecken sollen. In der gesamten Beschreibung der Figuren beziehen sich gleiche Ziffern auf gleiche oder ähnliche Elemente.

[0010] Es versteht sich, dass wenn ein Element als mit einem anderen Element „verbunden“ oder „gekoppelt“ bezeichnet wird, es direkt mit dem anderen Element verbunden oder gekoppelt sein kann oder Zwischenelemente vorhanden sein können. Wenn im Gegensatz ein Element als „direkt“ mit einem anderen Element „verbunden“ oder „gekoppelt“ bezeichnet wird, sind keine Zwischenelemente vorhanden. Sonstige zum Beschreiben des Verhältnisses zwischen Elementen benutzte Worte sollten auf gleichartige Weise ausgelegt werden (z. B. „zwischen“ gegenüber „direkt zwischen“, „benachbart“ gegenüber „direkt benachbart“ usw.).

[0011] Die hier angewandte Terminologie bezweckt nur das Beschreiben bestimmter Ausführungsbeispiele und soll nicht begrenzend für weitere Ausführungsbeispiele sein. Nach hiesigem Gebrauch sollen die Einzelformen „ein, eine“ und „das, der, die“ auch die Pluralformen umfassen, wenn der Zusammenhang nicht deutlich sonstiges anzeigt. Es versteht sich weiterhin, dass die Begriffe „umfasst“, „umfassend“, „aufweisen“ und/oder „aufweisend“ bei hiesigem Gebrauch das Vorhandensein angegebener Merkmale, Ganzzahlen, Schritte, Operationen, Elemente und/oder Bestandteile angeben, aber nicht das Vorhandensein oder die Zufügung eines oder mehrerer anderer Merkmale, Ganzzahlen, Schritte, Operationen, Elemente, Bestandteile und/oder Gruppen derselben ausschließen.

[0012] Sofern nicht anderweitig definiert besitzen alle hier benutzten Begriffe (einschließlich technischer und wissenschaftlicher Begriffe) die gleiche Bedeutung wie sie gewöhnlich von einem Durchschnittsfachmann auf dem Gebiet verstanden wird,

zu dem Ausführungsbeispiele gehören. Weiterhin versteht es sich, dass Begriffe, z. B. die in gewöhnlich benutzten Wörterbüchern definierten, als eine Bedeutung besitzend ausgelegt werden sollten, die ihrer Bedeutung im Zusammenhang der entsprechenden Technik entspricht. Sollte jedoch die vorliegende Offenbarung eine spezifische Bedeutung für einen Begriff angeben, die von einer Bedeutung abweicht, die ein Durchschnittsfachmann auf dem Gebiet üblicherweise so verstehen würde, soll diese Bedeutung in dem spezifischen Kontext dieser hierin gegebenen Definition berücksichtigt werden.

[0013] Fig. 1 zeigt ein Flussdiagramm eines Verfahrens zum Bilden eines Halbleiterbauelements gemäß einem Ausführungsbeispiel. Das Verfahren 100 umfasst das Implantieren 110 einer definierten Dosis von Protonen in ein Halbleitersubstrat und das Tempern 120 des Halbleitersubstrats gemäß einem definierten Temperaturprofil. Zumindest einer der Parameter der definierten Dosis von Protonen und des definierten Temperaturprofils wird abhängig zumindest von einem Kohlenstoff-bezogenen Parameter ausgewählt, der Informationen über eine Kohlenstoffkonzentration innerhalb von zumindest einem Teil des Halbleitersubstrats anzeigt.

[0014] Durch Auswählen der Dosis von Protonen für die Implantation und/oder das Temperaturprofil für das Ausheilen nach dem Implantieren basierend auf einer Kohlenstoffkonzentration innerhalb des Halbleiters kann die resultierende Dotierungskonzentration und/oder Dotierungsverteilung genauer und/oder flexibler eingestellt werden. Ferner können Substrate mit hoher Kohlenstoffkonzentration verwendet werden. Auf diese Weise kann die Dotierungseffizienz erhöht werden.

[0015] Substitutionalkohlenstoff Cs kann aus dem Gitter gedrückt werden und kann Interstitialkohlenstoff Ci während der Implantation der definierten Dosis von Protonen werden. Die Protonen können Protonen-induzierte Donatoren aufbauen (auch genannt Wasserstoff-induzierte Donatoren oder flachliegende thermische Donatoren) an den Gitterleerstellen, bevor sie durch den Substitutionalkohlenstoff Cs belegt werden. Der Interstitialkohlenstoff Ci kann CiOi-H-Komplexe oder CiO2i-H-Komplexe (oder andere CxiOxi-H-Komplexe) mit Sauerstoff und Wasserstoff aufbauen, das in dem Halbleiter verfügbar ist. Die CiOi-H-Komplexe können eine sehr niedrige Diffusionskonstante aufweisen und können ebenfalls als flachliegende, thermische Donatoren funktionieren. Daher kann die Dotierungskonzentration durch die CiOi-H-Komplexe erhöht werden. Ferner können die CiOi-H-Komplexe freien Wasserstoff binden, der ansonsten Wasserstoffkomplexe höherer Ordnung an den Gitterleerstellen aufbauen kann, bevor sie durch den Substitutionalkohlenstoff Cs belegt werden, was die Anzahl von thermischen

Donatoren reduzieren kann. Anders ausgedrückt können die CiO_i-H -Komplexe die Dotierungskonzentration durch Binden von freiem Wasserstoff erhöhen.

[0016] Das Halbleiterbauelement kann z.B. ein auf Silizium basierendes Halbleiterbauelement, ein auf Siliziumcarbid basierendes Halbleiterbauelement, ein auf Galliumarsenid basierendes Halbleiterbauelement oder ein auf Galliumnitrid basierendes Halbleiterbauelement sein. Das Halbleitersubstrat kann z.B. ein auf Silizium basierendes Halbleitersubstrat, ein auf Siliziumcarbid basierendes Halbleitersubstrat, ein auf Galliumarsenid basierendes Halbleitersubstrat oder ein auf Galliumnitrid basierendes Halbleitersubstrat sein. Das Halbleitersubstrat kann z.B. ein Wafer, ein Teil eines Wafers oder ein Halbleiterchip sein.

[0017] Der Kohlenstoff kann in das Halbleitersubstrat auf verschiedene Weisen eingelagert sein. Der Kohlenstoff kann während der Herstellung des Halbleitersubstrats selbst eingelagert werden (z.B. Kristallwachstum oder Epitaxialabscheidung) oder nach der Herstellung des Halbleitersubstrats und vor der Protonenimplantation.

[0018] Z.B. kann der Kohlenstoff in zumindest einen Teil des Halbleitersubstrats vor dem Implantieren der definierten Dosis von Protonen eingelagert werden durch Implantieren von Kohlenstoff in zumindest einen Teil (z.B. Feldstoppschicht oder Driftschicht) des Halbleitersubstrats. Die Implantationsenergie des Kohlenstoffimplantats kann so ausgewählt sein, dass eine gewünschte Kohlenstoffkonzentration und/oder ein Kohlenstoffprofil innerhalb des Halbleitersubstrats erhalten werden kann.

[0019] Alternativ oder zusätzlich kann der Kohlenstoff in zumindest einen Teil des Halbleitersubstrats eingelagert werden vor dem Implantieren der definierten Dosis von Protonen durch Diffundieren von Kohlenstoff in zumindest einen Teil des Halbleitersubstrats. Eine Diffusionstemperatur, Diffusionszeit und/oder bereitgestellte Kohlenstoffmenge zur Diffusion können so ausgewählt sein, dass eine gewünschte Kohlenstoffkonzentration und/oder ein Kohlenstoffprofil innerhalb des Halbleitersubstrats erhalten werden kann. Z.B. wird Kohlenstoff, der die Löslichkeitsgrenze von Kohlenstoff bei Raumtemperatur in dem Halbleitersubstrat überschreitet, während des Diffusionsprozesses bereitgestellt. Die Löslichkeitsgrenze von Kohlenstoff 710 (Sole) in Silizium für unterschiedliche Temperaturen ist in **Fig. 7** gezeigt.

[0020] Alternativ oder zusätzlich kann der Kohlenstoff eingelagert werden durch Wachsen von zumindest einem Teil des Halbleitersubstrats mit einer definierten Kohlenstoffverteilung. Anders ausgedrückt

kann der Kohlenstoff bereits während der Herstellung des Halbleitersubstrats selbst eingelagert werden (z.B. Kristallwachstum oder Epitaxialabscheidung). Auf diese Weise kann eine sehr homogene Kohlenstoffkonzentration durch das gesamte Halbleitersubstrat oder durch eine abgeschiedene Schicht - oder einen gewachsenen Teil des Halbleitersubstrats erhalten werden.

[0021] Unabhängig von dem Verfahren, das zum Einlagern des Kohlenstoffs in das Halbleitersubstrat verwendet wird, kann ein Teil des Kohlenstoffs nachfolgend herausdiffundiert werden. Anders ausgedrückt kann das Verfahren 100 zusätzlich das Herausdiffundieren von Kohlenstoff aus dem Halbleitersubstrat durch Tempern des Halbleitersubstrats gemäß einem definierten Diffusionstemperaturprofil aufweisen. Z.B. kann das Halbleitersubstrat auf eine vordefinierte Temperatur für eine vordefinierte Zeit in einer Atmosphäre ohne Kohlenstoff oder mit Kohlenstoff auf einem niedrigen Pegel erwärmt werden (z.B. wesentlich unter der Löslichkeit von Kohlenstoff bei dieser Temperatur), sodass Kohlenstoff aus dem Halbleitersubstrat herausdiffundiert. Auf diese Weise kann ein gewünschtes Kohlenstoffprofil (z.B. Schildkröten-förmiges Profil) erhalten werden.

[0022] Z.B. kann die Kohlenstoffkonzentration (z.B. durchschnittliche Kohlenstoffkonzentration oder maximale Kohlenstoffkonzentration) innerhalb von zumindest einem Teil des Halbleitersubstrats höher sein als $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (oder höher sein als $1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ oder höher als $5 \cdot 10^{15}$ oder sogar höher als $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$).

[0023] Alternativ oder zusätzlich kann die Kohlenstoffkonzentration (z.B. mittlere Kohlenstoffkonzentration oder maximale Kohlenstoffkonzentration) unter einer Obergrenze gehalten werden, um den beschriebenen Effekt zu steuern oder zu minimieren. Z.B. kann die Kohlenstoffkonzentration innerhalb von zumindest einem Teil des Halbleitersubstrats niedriger sein als $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (oder niedriger sein als $1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ oder niedriger als $5 \cdot 10^{15}$).

[0024] Die definierte Dosis von Protonen kann mit einer Einzelimplantationsenergie implantiert werden oder kann über mehrere Implantationsenergien oder Implantationsenergiebereiche verteilt sein, was zu Implantationsmaxima bei einer oder mehreren Tiefen innerhalb des Halbleitersubstrats führt. Z.B. ist die definierte Dosis von Protonen höher als $1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, $1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ (oder höher als $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ oder höher als $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$).

[0025] Die definierte Dosis von Protonen kann von einer Vorderseite des Halbleitersubstrats implantiert werden. Eine Vorderseite des Halbleitersubstrats kann eine Seite des Halbleitersubstrats sein, auf der die komplexeren Strukturen hergestellt werden

sollen (z.B. Transistorstrukturen und/oder Verdrahtung), während die Rückseite des Halbleitersubstrats eine Seite des Halbleitersubstrats sein kann, auf der weniger komplexe Strukturen hergestellt werden sollen (z.B. Transistorstrukturen und/oder Verdrahtung).

[0026] Z.B. wird die definierte Dosis von Protonen in ein Halbleitersubstrat implantiert 110, um eine definierte Konzentration von Interstitialkohlenstoff in zumindest einem Teil des Halbleitersubstrats zu erzeugen.

[0027] Das Tempern 120 kann mit dem definierten Temperaturprofil oder der Temperaturrampe ausgeführt werden. Das definierte Temperaturprofil kann den Verlauf der Temperatur über der Zeit während des Temperns des Halbleitersubstrats definieren. Das definierte Temperaturprofil kann eine Maximaltemperatur unter oder kleiner als 500°C (oder kleiner als 550°C oder kleiner als 450°C) aufweisen. Die Protonen-induzierten Donatoren können während des Temperns 120 aktiviert werden.

[0028] Die Realisierung der Protonen-induzierten Donatoren und der nachfolgenden Prozessschritte für die Realisierung der Leistungsbaulemente kann bei Temperaturen unter 500°C (oder unter 550°C oder unter 450°C) nach der Implantation 110 der definierten Dosis von Protonen ausgeführt werden. Auf diese Weise kann eine Diffusion oder eine Änderung der Kohlenstoffverteilung und/oder Wasserstoff-induzierter Donatoren vermieden oder niedrig gehalten werden. Optional kann ein Laserprozess in einem Schmelz- oder Nicht-Schmelz-Modus auf der Wafer-Rückseite ausgeführt werden (z.B. für die Aktivierung eines Rückseitenemitters für IGBTs oder eines Emitters für Dioden oder einer Drain-Zone für Leistungs-MOSFETs) nach der Protonen-Bestrahlung, was unkritisch für die Protonen-induzierte Dotierung sein kann aufgrund der starken Lokalisierung des Temperaturmaximums nahe der Wafer-Rückseite.

[0029] Die definierte Dosis von Protonen und/oder das definierte Temperaturprofil wird ausgewählt oder vordefiniert abhängig von einem Kohlenstoff-bezogenen Parameter, der Informationen über eine Kohlenstoffkonzentration innerhalb von zumindest einem Teil des Halbleitersubstrats anzeigt (z.B. eine mittlere oder maximale Kohlenstoffkonzentration innerhalb einer Region von Interesse, z.B. Driftzone oder Feldstopp, oder innerhalb des gesamten Halbleitersubstrats).

[0030] Der Kohlenstoff-bezogene Parameter kann die Kohlenstoffkonzentration selbst sein (z.B. mittlere oder maximale Kohlenstoffkonzentration) oder ein Parameter proportional zu der Kohlenstoffkonzentration oder eine Bestimmung der Kohlenstoff-

konzentration ermöglicht. Z.B. kann der Kohlenstoff-bezogene Parameter ein elektrischer Widerstandswert oder eine Dotierungskonzentration des Halbleitersubstrats von der Implantation oder eines vergleichbaren Wafers (z.B. aus demselben Stück von gewachsenem Halbleiterkristall) nach der Implantation sein. Der elektrische Widerstandswert oder die Dotierungskonzentration des Halbleitersubstrats können Informationen sein, die eine Kohlenstoffkonzentration anzeigen, da diese Parameter proportional zu der Kohlenstoffkonzentration sein können oder der die Bestimmung der Kohlenstoffkonzentration ermöglichen können.

[0031] Z.B. kann das Verfahren optional das Messen einer Kohlenstoffkonzentration (oder eines anderen Parameters, der die Kohlenstoffkonzentration anzeigt) von zumindest einem Teil des Halbleitersubstrats oder einer Kohlenstoffkonzentration (oder eines anderen Parameters, der die Kohlenstoffkonzentration anzeigt) von zumindest einem Teil eines anderen Halbleitersubstrats umfassen, das zusammen mit dem Halbleitersubstrat des Halbleiterbauelements hergestellt wird, das gebildet werden soll. Die Kohlenstoffkonzentration kann direkt oder indirekt gemessen werden (z.B. orts aufgelöste Tiefebene-Transienten-Spektroskopie und/oder Infrarotmessung oder Messung eines elektrischen Widerstandswerts oder einer Dotierungskonzentration des Halbleitersubstrats).

[0032] Z.B. können ein oder mehrere Vorläuferwafer (z.B. drei) oder ein oder mehrere Testwafer vollständig oder teilweise verarbeitet werden. Z.B. kann das Wärmebudget des Gesamtprozesses ausgeführt werden (z.B. Weglassen des Grabenätzens) und eine Protonenimplantation. Die Vorläuferwafer oder Testwafer können gemessen werden (z.B. durch IR, DLTS, Ausbreitungswiderstandsprofilierung (SRP; Spreading Resistance Profiling) oder elektrische Messung), um z.B. die Dotierungskonzentration zu bestimmen und den Prozess für die verbleibenden Wafer anzupassen. Anders ausgedrückt kann das Verfahren ferner das Verarbeiten von einem oder mehreren Testwafern und das Bestimmen eines Kohlenstoff-bezogenen Parameters von einem oder mehreren der Testwafer aufweisen. Ferner können weitere Wafer basierend auf dem bestimmten, Kohlenstoff-bezogenen Parameter verarbeitet werden.

[0033] Zusätzlich dazu kann das Verfahren 100 optional ferner das Implantieren von Elektronen, Alphapartikeln, Helium oder weiteren Protonen in das Halbleitersubstrat mit einer definierten Energieverteilung aufweisen, um Interstitialhalbleiteratome mit einer definierten Tiefenverteilung zu erzeugen. Auf diese Weise kann die Anzahl von resultierenden CiOi-H-Komplexen weiter erhöht werden.

[0034] Eine große Vielzahl von Halbleiterbauelementen kann gemäß dem vorgeschlagenen Konzept oder einem oder mehreren der vorangehend oder nachfolgend beschriebenen Ausführungsbeispiele herstellbar sein. Z.B. können Halbleiterbauelemente mit einer oder mehreren Transistorstrukturen basierend auf dem vorgeschlagenen Konzept hergestellt werden. Z.B. können Leistungshalbleiterbauelemente (z.B. Bipolartransistor mit isoliertem Gate (IGBT; Insulated Gate Bipolar Transistor); oder ein vertikaler Feldeffekttransistor) oder Dioden basierend auf dem vorgeschlagenen Konzept hergestellt werden. Z.B. kann ein Leistungshalbleiterbauelement eine Blockierspannung über 100 V (oder über 500 V, über 1000 V oder über 1500 V, z.B. 600 V, 1200 V oder 1700 V) aufweisen.

[0035] Fig. 2 zeigt einen schematischen Querschnitt eines Halbleiterbauelements gemäß einem Ausführungsbeispiel. Das Halbleiterbauelement 200 umfasst zumindest eine Transistorstruktur. Die Transistorstruktur umfasst einen Emitter- oder Source-Anschluss 210 und einen Kollektor- oder Drain-Anschluss 220. Eine Kohlenstoffkonzentration 230 innerhalb eines Halbleitersubstrats 240, das zwischen dem Emitter- oder Source-Anschluss 210 und dem Kollektor- oder Drain-Anschluss 22 angeordnet ist, variiert zwischen dem Emitter- oder Source-Anschluss 210 und dem Kollektor- oder Drain-Anschluss 220.

[0036] Ein zusätzlicher Freiheitsgrad zum Implementieren eines gewünschten Dotierungsprofils von Transistoren kann bereitgestellt werden durch Implementieren einer Kohlenstoffkonzentration, die zwischen den Anschlüssen des Transistors variiert. Zusätzlich oder alternativ können weniger Protonen notwendig sein, um eine gewünschte Dotierungskonzentration zu erreichen, wenn die Kohlenstoffkonzentration so erhöht wird, dass die Dotierungseffizienz erhöht werden kann.

[0037] Zumindest eine Transistorstruktur kann z.B. eine bipolare Transistorstruktur mit einem Kollektor-Anschluss, einem Emitter-Anschluss und einem Basis-Anschluss sein, kann eine Feldeffekttransistorstruktur sein, die einen Source-Anschluss, einen Drain-Anschluss und einen Gate-Anschluss aufweist oder kann eine Transistorstruktur mit isoliertem Gate sein, die einen Emitter-Anschluss, einen Kollektoranschluss und einen Gate-Anschluss aufweist.

[0038] Der Emitter- oder Source-Anschluss 210 und der Kollektor- oder Drain-Anschluss 220 können Anschlüsse sein, die eine elektrische Verbindung mit anderen Anschlüssen an dem Halbleiterbauelement oder mit Anschlüssen eines externen Bauelements ermöglichen. Z.B. kann der Emitter- oder Source-Anschluss 210 eine Emitter- oder Source-Implantationsregion, eine Anschlussfläche, die mit der

Emitter- oder Source-Implantationsregion verbunden ist oder eine Vorderseitenmetallschicht sein, die mit der Emitter- oder Source-Implantationsregion verbunden ist. Z.B. kann der Kollektor- oder Drain-Anschluss 220 eine Kollektor- oder Drain-Implantationsregion, eine Anschlussfläche, die mit der Kollektor- oder Drain-Implantationsregion verbunden ist oder eine Rückseitenmetallschicht sein, die mit der Kollektor- oder Drain-Implantationsregion verbunden ist.

[0039] Ein Beispiel für eine variierende Kohlenstoffkonzentration ist neben dem Querschnitt von Fig. 2 gezeigt. Die lokale Kohlenstoffkonzentration variiert für unterschiedliche Tiefen innerhalb des Halbleitersubstrats des Halbleiterbauelements 200. Z.B. kann die Kohlenstoffkonzentration zwischen $1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ und $2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ variieren (oder zwischen $1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ und $1 \cdot 10^{17}$ oder zwischen $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ und $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$). Z.B. umfasst das Kohlenstoffkonzentrationsprofil zwischen dem Emitter- oder Source-Anschluss 210 und dem Kollektor- oder Drain-Anschluss 220 eine maximale Kohlenstoffkonzentration von weniger als $2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ und eine minimale Kohlenstoffkonzentration von mehr als $1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. Z.B. kann eine maximale Kohlenstoffkonzentration des Kohlenstoffkonzentrationsprofils mehr als zwei Mal (oder mehr als zehn Mal oder mehr als 50 Mal) eine minimale Kohlenstoffkonzentration des Kohlenstoffkonzentrationsprofils sein.

[0040] Z.B. kann das Halbleiterbauelement 200 eine erhöhte Kohlenstoffkonzentration innerhalb einer Driftschicht oder Driftzone der Transistorstruktur im Vergleich zu anderen Regionen des Halbleitersubstrats des Halbleiterbauelements 200 aufweisen oder kann eine erhöhte Kohlenstoffkonzentration innerhalb einer Feldstoppschicht oder Feldstoppzone der Transistorstruktur im Vergleich zu einer Driftschicht oder Driftzone der Transistorstruktur aufweisen.

[0041] Das Halbleiterbauelement kann ein dünnes Halbleitersubstrat aufweisen. Z.B. umfasst das Halbleitersubstrat des Halbleiterbauelements eine Dicke von weniger als 200 μm (oder weniger als 150 μm , weniger als 100 μm oder weniger als 80 μm). Z.B. kann Kohlenstoff in das Halbleitersubstrat von der Rückseite diffundiert werden (z.B. in eine Feldstoppzone des Halbleiterbauelements) und/oder zumindest ein Teil einer definierten Dosis von Protonen kann von der Rückseite des Halbleitersubstrats implantiert werden.

[0042] Alternativ können die Kohlenstoffatome von der Vorderseite implantiert werden. Z.B. kann dieser Implantationsschritt am Anfang des Herstellungsprozesses ausgeführt werden, sodass eine Tief-Eindiffusion der Kohlenstoffatome erreicht werden kann. Optional kann ein zusätzlicher Hochtemperaturschritt zwischen dem Kohlenstoffimplantationsschritt

und den Herstellungsprozessen ausgeführt werden, die für die Realisierung des Leistungsbauelements erforderlich sind, um eine tiefere Penetrationstiefe der eindiffundierten Kohlenstoffatome zu erreichen.

[0043] Weitere Details und Aspekte des Halbleiterbauelements 200 (z.B. Halbleitersubstrat, Implementieren einer variierenden Kohlenstoffkonzentration) werden in Verbindung mit dem vorgeschlagenen Konzept oder einem oder mehreren der vorangehend oder nachfolgend beschriebenen Beispiele erwähnt (z.B. **Fig. 1** oder **Fig. 3-6**). Das Halbleiterbauelement 200 kann ein oder mehrere optionale zusätzliche Merkmale umfassen, die einem oder mehreren Aspekten des vorgeschlagenen Konzepts oder einem oder mehreren der vorangehend oder nachfolgend beschriebenen Beispiele entsprechen.

[0044] **Fig. 3** zeigt einen schematischen Querschnitt eines Teils einer Bipolartransistoranordnung 350 mit isoliertem Gate, die eine Transistorstruktur eines Halbleiterbauelements gemäß einem Ausführungsbeispiel darstellt. Die Bipolartransistoranordnung 350 mit isoliertem Gate umfasst eine Halbleiterstruktur (z.B. auf Silizium basierend oder auf Siliziumcarbid basierend), die eine Kollektorschicht 360, eine Driftschicht 370, eine Mehrzahl von Body-Bereichen 380, eine Mehrzahl von Source-Bereichen 385 und ein Gate 390 einer Mehrzahl von Gates 390 (z.B. von ähnlichen oder gleichen Strukturen, die über die Bipolartransistoranordnung mit isoliertem Gate verteilt sind). Die Mehrzahl von Source-Bereichen 385 und die Driftschicht 370 umfassen zumindest hauptsächlich einen ersten Leitfähigkeitstyp (z.B. n oder p) und die Mehrzahl von Body-Bereichen 380 und die Kollektorschicht 360 umfassen zumindest hauptsächlich einen zweiten Leitfähigkeitstyp (z.B. p oder n). Die Mehrzahl von Gates 390 ist so angeordnet, dass die Gates 390 in der Lage sind, einen leitfähigen Kanal 392 zwischen den Source-Bereichen 385 und der Driftschicht 370 durch die Body-Bereiche 380 zu verursachen. Die Gates 390 können elektrisch zumindest von den Body-Bereichen 380 durch eine Isolationsschicht 394 isoliert sein (z.B. Gate-Oxidschicht).

[0045] Die Body-Bereiche 380 und die Kollektorschicht 360 umfassen den zweiten Leitfähigkeitstyp, der eine p-Dotierung (z.B. verursacht durch Einlagern von Aluminium-Ionen oder Bor-Ionen) oder eine n-Dotierung (z.B. verursacht durch Einlagern von Stickstoff-Ionen, Phosphor-Ionen oder Arsen-Ionen) sein. Folglich zeigt der zweite Leitfähigkeitstyp eine entgegengesetzte n-Dotierung oder p-Dotierung an. Anders ausgedrückt kann der erste Leitfähigkeitstyp eine n-Dotierung anzeigen und der zweite Leitfähigkeitstyp eine p-Dotierung anzeigen, oder umgekehrt.

[0046] Die Mehrzahl der Gates 390 kann so angeordnet sein, dass die Gates 390 einen leitfähigen Kanal 392 zwischen den Source-Bereichen 385 und der Drift-Schicht 370 durch die Body-Bereiche 380 verursachen, gemäß einem Feldeffekttransistorprinzip. Anders ausgedrückt ist die Mehrzahl der Gates 390 in der Nähe der Body-Bereiche 380 angeordnet aber elektrisch von dem Body-Bereich 380 durch eine Isolierschicht 390 isoliert, sodass ein leitfähiger Kanal 392 zwischen den Source-Bereichen 385 und der Drift-Schicht durch eine Spannung gesteuert werden kann, die an die Gates 390 angelegt ist.

[0047] Anders ausgedrückt kann die Transistorstruktur eine Driftschicht 370 umfassen, die zwischen dem Emitter- oder Source-Anschluss 210 und dem Kollektor- oder Drain-Anschluss 320 angeordnet ist. Optional kann die Transistorstruktur auch eine Feldstoppschicht umfassen, die zwischen der Driftschicht 370 und dem Kollektor- oder Drain-Anschluss 220 angeordnet ist. Die Feldstoppschicht (auch genannt Feldstoppzone) kann eine durchschnittliche Kohlenstoffkonzentration von zumindest zwei Mal (oder zumindest zehn Mal oder zumindest 50 Mal) einer durchschnittlichen Kohlenstoffkonzentration der Driftschicht 370 aufweisen. Dies kann z.B. durch einen Kohlenstoffimplantationsschritt mit einem nachfolgenden Eintreibschritt oder durch Epitaxial-Abscheidungstechniken realisiert werden.

[0048] Ein Halbleiterbauelement 200 kann hauptsächlich oder ausschließlich die Bipolartransistoranordnung mit isoliertem Gate umfassen oder kann ferner elektrische Elemente oder Schaltungen umfassen (z.B. Steuerungseinheit zum Steuern der Bipolartransistoranordnung mit isoliertem Gate oder einer Leistungsversorgungseinheit).

[0049] Weitere Details und Aspekte des Halbleiterbauelements 200 mit einer oder mehreren Bipolartransistoranordnungen 350 mit isoliertem Gate (z.B. Halbleitersubstrat, Implementieren einer variierenden Kohlenstoffkonzentration) werden in Verbindung mit dem vorgeschlagenen Konzept oder einem oder mehreren der vorangehend oder nachfolgend beschriebenen Beispiele erwähnt (z.B. **Fig. 1** bis **Fig. 2** oder **Fig. 4** bis **Fig. 6**). Das Halbleiterbauelement, das in **Fig. 3** gezeigt ist, kann ein oder mehrere optionale zusätzliche Merkmale umfassen, die einem oder mehreren Aspekten des vorgeschlagenen Konzepts oder einem oder mehreren der vorangehend oder nachfolgend beschriebenen Beispiele entsprechen.

[0050] Z.B. kann die definierte Dosis von Protonen, die in Verbindung mit einem oder mehreren der vorangehend oder nachfolgend aufgeführten Ausführungsbeispiele erwähnt wurde (z.B. **Fig. 1**) in das Halbleitersubstrat implantiert werden durch Implantieren einer definierten Dosis von Protonen in

eine Driftschichtregion des Halbleiterbauelements, das gebildet werden soll.

[0051] Alternativ oder zusätzlich kann Kohlenstoff durch epitaxiale Techniken in eine Feldstoppschichtregion des zu bildenden Halbleiterbauelements implantiert, diffundiert oder eingelagert werden, sodass eine durchschnittliche Kohlenstoffkonzentration innerhalb der Driftschichtregion niedriger ist als eine durchschnittliche Kohlenstoffkonzentration innerhalb der Feldstoppschichtregion.

[0052] Z.B. können die Driftschichtregion und die Feldstoppschichtregion durch zwei unabhängige Implantations- und Ausheil-Prozesse gebildet werden. Der Implantationsprozess für die Driftschicht kann eine Implantation von Protonen mit einer oder mehreren Implantationsenergien umfassen und der Ausheilprozess für die Driftschicht kann ein Tempern gemäß einem definierten Temperaturprofil umfassen (z.B. mit einer Maximaltemperatur von im Wesentlichen 490°C). Der Implantationsprozess für die Feldstoppschicht kann eine Implantation von Protonen mit einer oder mehreren Implantationsenergien umfassen und der Ausheilprozess für die Feldstoppschicht kann ein Tempern gemäß einem definierten Temperaturprofil aufweisen (z.B. mit einer Maximaltemperatur von im Wesentlichen 400°C oder 420°C).

[0053] Fig. 4 zeigt einen schematischen Querschnitt einer Mesa-Bipolartransistorstruktur 400 mit isoliertem Gate. Die Mesa-Bipolartransistorstruktur 400 mit isoliertem Gate umfasst eine Kollektorschicht 460 (z.B. Dotierungskonzentration von $1\text{e}16$ bis $1\text{e}18/\text{cm}^2$) und eine Rückseitenkollektormetallschicht 462 für einen elektrischen Kontakt 464 mit der Kollektorschicht 460 der Mesa-Bipolartransistorstruktur 400 mit isoliertem Gate an einer Rückseite der Mesa-Bipolartransistorstruktur 400 mit isoliertem Gate. Ferner umfasst die Mesa-Bipolartransistorstruktur 400 mit isoliertem Gate eine Driftschicht 470 benachbart zu der Kollektorschicht 460 und eine Body-Schicht (z.B. abgeschieden oder implantiert), die Body-Bereiche 480 (z.B. Dotierungskonzentration von $1\text{e}17$ bis $1\text{e}19/\text{cm}^2$) benachbart zu der Driftschicht 470 (z.B. Dotierungskonzentration von $1\text{e}12$ bis $1\text{e}14/\text{cm}^2$) aufweist. Zusätzlich dazu umfasst die Mesa-Bipolartransistorstruktur 400 mit isoliertem Gate Source-Bereiche 485 in Kontakt mit einer Source-Metallschicht 486 für einen elektrischen Kontakt 487 benachbart zu den Body-Bereichen 480. Zusätzlich dazu können auch die Body-Bereiche 480 in Kontakt mit einer Source-Metallschicht 486 sein. Ferner sind Gräben, die Gates 490 umfassen (z.B. Polysilizium-Gates), die vertikal durch die Body-Schicht reichen, mit einer vordefinierten, lateralen Distanz zueinander angeordnet. Die Gates können elektrisch durch eine Gate-Verdrahtung 492 (nicht gezeigt) verbunden sein. Optional kann die Mesa-Bipolartransistorstruktur 400 mit iso-

liertem Gate eine Feldstoppschicht zwischen der Driftschicht 470 und der Kollektorschicht 460 aufweisen.

[0054] Die Mesa-Bipolartransistorstruktur 400 mit isoliertem Gate umfasst Body-Bereiche, die Mesa-Strukturen repräsentieren. Eine Mesa-Struktur umfasst eine wesentlich größere (z.B. mehr als 5 Mal größer oder mehr als 10 Mal größer) Abmessung in einer lateralen Richtung als in einer anderen lateralen Richtung (z.B. orthogonalen lateralen Richtung).

[0055] Weitere Details und Aspekte des Halbleiterbauelements mit einer oder mehreren Mesa-Bipolartransistorstrukturen 400 mit isoliertem Gate 350 (z.B. Halbleitersubstrat, Implementieren einer variierenden Kohlenstoffkonzentration) werden in Verbindung mit dem vorgeschlagenen Konzept oder einem oder mehreren der vorangehend oder nachfolgend beschriebenen Beispiele erwähnt (z.B. Fig. 1 bis Fig. 3 oder Fig. 5 bis Fig. 6). Das Halbleiterbauelement, das in Fig. 4 gezeigt ist, kann ein oder mehrere optionale zusätzliche Merkmale umfassen, die einem oder mehreren Aspekten des vorgeschlagenen Konzepts oder einem oder mehreren der vorangehend oder nachfolgend beschriebenen Beispiele entsprechen.

[0056] Fig. 5 zeigt Beispiele von zwei möglichen Verteilungen 511 und 521 von Kohlenstoff innerhalb eines Halbleitersubstrats in der Region der Feldstoppschicht 540. Die Feldstoppschicht 540 kann eine Dicke zwischen $3\ \mu\text{m}$ und $50\ \mu\text{m}$ oder zwischen 5 und $30\ \mu\text{m}$ aufweisen und kann zwischen einer Driftschicht (z.B. Dicke zwischen $40\ \mu\text{m}$ und $220\ \mu\text{m}$ abhängig von der Blockierspannung des zu bildenden Halbleiterbauelements) und einer Kollektorschicht 550 (die z.B. eine Dicke zwischen $200\ \text{nm}$ und $500\ \text{nm}$ aufweist) angeordnet sein.

[0057] Das Diagramm zeigt die Abweichung der Konzentration von Wasserstoff-induzierten Donatoren HD und der Kohlenstoffkonzentration (in beliebigen Einheiten) über der Tiefe (in beliebigen Einheiten) gemessen orthogonal zu einer Vorderseite oder Rückseite des Halbleitersubstrats an.

[0058] Das Halbleiterbauelement, das in Fig. 3, Fig. 4 oder Fig. 5 gezeigt ist, kann eine Feldstoppschicht mit einem Feldstoppprofil 520 aufweisen, gezeigt in Fig. 5.

[0059] Fig. 5 zeigt einen Vergleich eines herkömmlichen erzeugten Protonenfeldstoppprofiles 510 (Konzentration von Wasserstoff-induzierten Donatoren HD) mit einer entsprechenden Kohlenstoffverteilung 511 mit einem Beispiel eines vorgeschlagenen Feldstoppprofiles 520 (Konzentration von Wasserstoff-induzierten Donatoren HD) bzw. einer entsprechenden

Kohlenstoffverteilung 521. Das Profil 521 zeigt eine unterstützende Ci-Oi-H-bezogene Dotierung, induziert durch die Einlagerung von zusätzlichem Kohlenstoff 521. Bei dieser Simulation waren die implantierte Dotierungsdosis und die Ausheilbedingungen dieselben. Alternativ kann die Kohlenstoffkonzentration beabsichtigt ungefähr homogen über die gesamte vertikale Erstreckung des Wafers verbessert werden, um einen höheren Dotierungspegel für die Feldstoppzone und einen geringeren Unterschied zwischen der Dotierungskonzentration der Dotierungsspitzen und den benachbarten Minima z.B. für gegebene Implantationsdosen und Ausheilbedingungen zu erreichen (was z.B. zu einer verbesserten Einheitlichkeit des Feldstopp Profils und damit zu einer verbesserten Weichheit während des Abschaltens der Bauelemente führt).

[0060] Fig. 6 zeigt ein Flussdiagramm eines Verfahrens zum Bilden eines Halbleiterbauelements. Das Verfahren 600 umfasst das Implantieren 610 einer ersten definierten Dosis von Protonen in einen ersten Halbleiterwafer und das Tempern 620 des ersten Halbleiterwafers gemäß einem ersten, definierten Temperaturprofil. Zumindest eines der ersten definierten Dosis von Protonen und des ersten definierten Temperaturprofils wird abhängig von einem Kohlenstoff-bezogenen Parameter ausgewählt, der Informationen über eine erste Kohlenstoffkonzentration innerhalb von zumindest einem Teil des ersten Halbleiterwafers anzeigt. Ferner umfasst das Verfahren 600 das Implantieren 630 einer zweiten definierten Dosis von Protonen in einen zweiten Halbleiterwafer und das Tempern 630 des zweiten Halbleiterwafers gemäß einem zweiten definierten Temperaturprofil. Zumindest eines der zweiten definierten Dosis von Protonen und des zweiten definierten Temperaturprofils wird abhängig von einem Kohlenstoff-bezogenen Parameter ausgewählt, der Informationen über eine zweite Kohlenstoffkonzentration innerhalb von zumindest einem Teil des zweiten Halbleiterwafers anzeigt. Ferner unterscheidet sich die erste Kohlenstoffkonzentration von der zweiten Kohlenstoffkonzentration (z.B. um mehr als 10% der ersten Kohlenstoffkonzentration, mehr als 50% der ersten Kohlenstoffkonzentration oder zumindest um einen Faktor von 2 für einen Mittelwert).

[0061] Durch Anpassen der definierten Dosis von Protonen, die implantiert werden soll und/oder des definierten Temperaturprofils, das zum Tempern des Halbleiterwafers verwendet wird, basierend auf der Kohlenstoffkonzentration des Halbleiterwafers, kann ermöglicht werden, Halbleitersubstrate mit einer unterschiedlichen Kohlenstoffkonzentration zum Bilden unterschiedlicher Halbleiterbauelemente oder der gleichen Halbleiterbauelemente zu verwenden.

[0062] Weitere Details und Aspekte des Verfahrens 600 (z.B. Halbleitersubstrat, Implementieren einer variierenden Kohlenstoffkonzentration, Einlagern von Kohlenstoff, Kohlenstoff-bezogene Parameter) werden in Verbindung mit dem vorgeschlagenen Konzept oder einem oder mehreren der vorangehend oder nachfolgend beschriebenen Beispiele erwähnt (z.B. Fig. 1 bis Fig. 5). Das Verfahren 600 kann ein oder mehrere optionale zusätzliche Merkmale umfassen, die einem oder mehreren Aspekten des vorgeschlagenen Konzepts oder einem oder mehreren der vorangehend oder nachfolgend beschriebenen Beispiele entsprechen.

[0063] Einige Ausführungsbeispiele beziehen sich auf ein Verfahren zum Erhöhen der Dotierungseffizienz einer Protonenbestrahlung. Eine Erhöhung der Dotierungseffizienz und/oder ein Einstellen der Profilform der sogenannten Protonendotierung kann durch eine gezielte Addition einer definierten Kohlenstoffkonzentration in dem Halbleiterkristall erreicht werden.

[0064] Z.B. kann die Dotierungseffizienz von Donatoren, die durch eine Protonenbestrahlung in Kombination mit einem geeigneten Tempern erzeugt wird, erhöht werden, um die erforderliche Protonendosis und folglich die Prozesskosten zu reduzieren und/oder um den Freiheitsgrad zum Einstellen unterschiedlicher Dotierungsprofilformen zu erhöhen.

[0065] Z.B. kann eine definierte Kohlenstoffkonzentration in die Region der Driftzone eines zu dotierenden Bauelements eingefügt werden (z.B. IGBT), um die Donatorkonzentration zu erhöhen, die durch eine spezifische Protonendosis und Tempern durch die Erzeugung von Ci-Oi-H-Komplexen erreichbar ist, die aus einem geeigneten Ausheilprozess resultieren.

[0066] Gemäß einem Aspekt kann Kohlenstoff zu der Tiefe des Feldstopps diffundiert werden (z.B. von der Vorderseite), gesteuert durch die Solidstate-Löslichkeit von Substitutionalkohlenstoff in Silizium, sodass eine ausreichende Reproduzierbarkeit und laterale Homogenität der Dotierungskonzentration in der Driftzone existieren kann. Die Diffusionskonstante von Substitutionalkohlenstoff ist in Fig. 8 gezeigt. Zusätzlich dazu kann Interstitialkohlenstoff verwendet werden, um den gewünschten Effekt zu nutzen (z.B. Erhöhen der Inflationseffizienz).

[0067] Die Kohlenstoffdiffusion (in den Halbleiter) kann in der Prozesssequenz integriert sein, sodass der eingelagerte Kohlenstoff tief genug in den Halbleiterwafer diffundiert wird und z.B. nachfolgend nicht wesentlich herausdiffundiert wird. Gemäß einem Aspekt wird der Substitutionalkohlenstoff am Anfang des Prozesses (in den Halbleiter) diffundiert.

[0068] Alternativ kann der Kohlenstoff am Anfang der Verarbeitung in das Silizium eingelagert werden. Z.B. kann dies durch eine entsprechende Addition von Kohlenstoff während des Kristallwachstumsprozesses erreicht werden. Die Startkonzentration von Kohlenstoff kann bestimmt werden wenn die Solidstate-Löslichkeit von Kohlenstoff in Silizium unterschritten wird. Dies kann ausgeführt werden durch eine Infrarot-(IR-)Messung oder alternativ durch einen Vorläuferwafer, der zum Bestimmen der Dotierungsänderung aufgrund des vorhandenen Kohlenstoffs an einem Protonenimplantat verwendet wird. Das Messergebnis kann aufgrund des bekannten Segregationsverhaltens von Kohlenstoff auf eine größere Anzahl von Wafern übertragen werden.

[0069] Alternativ kann der Kohlenstoff auf den Wafer durch eine Epitaxialschicht abgeschieden werden. Der Kohlenstoff kann auf definierte Weise in das Schichtprofil während des Wachstums eingelagert werden. Eine Vielzahl von möglichen Dotierungsprofilen kann durch eine gezielte vertikale Abweichung der Kohlenstoffkonzentration implementiert werden.

[0070] Der Kohlenstoff kann hauptsächlich (z.B. mehr als 90% oder mehr als 99%) in seiner Substitutionalform innerhalb des Siliziumkristallgitters vor dem Protonenimplantationsschritt existieren. Auf diese Weise kann erreicht werden, dass die zusätzlich eingelagerte Donatorenkonzentration proportional zu den Implantations- und Temper-Parametern sein kann, sodass ein reproduzierbarer Effekt erreicht werden kann.

[0071] Interstitialsilizium-Atome können zusätzlich zu Protonen-induzierten Donatoren und Gitterleerstellen während der Protonenimplantation und dem nachfolgenden Temperschritt erzeugt werden (z.B. bei Temperaturen zwischen 300°C und 550°C oder zwischen 350°C und 500°C). Die Interstitialsilizium-Atome können mit einer vergleichbar schnellen Diffusionskonstante bereits bei Raumtemperatur diffundieren. Der existierende Substitutionalkohlenstoff kann als Getter-Zentrum für die freien Interstitialsilizium-Atome funktionieren, wodurch Interstitialkohlenstoff C_i erzeugt werden kann. Der Übergang von C_s zu C_i kann auch durch den Energietransfer der implantierten Protonen induziert werden. Der Interstitialkohlenstoff kann seinerseits gewünschte C_iO_i-H -Komplexe mit dem verfügbaren Sauerstoff und dem implantierten Wasserstoff aufbauen. Der Prozess kann auf die anfängliche Konzentration und Verteilung des Substitutionalkohlenstoffs C_s beschränkt sein, da die Konzentration von Interstitialsauerstoff O_i innerhalb eines verwendeten Substrats höher sein kann als die Konzentration von Substitutionalkohlenstoff C_s . Auf diese Weise kann das resultierende Dotierungsprofil mit einem zusätzlichen Freiheitsgrad einstellbar sein. Z.B. können die C_iO_i-H -

Donatoren in einer definierten Tiefe und/oder Profil zusätzlich zu den Protonen-induzierten Donatoren erzeugt werden und können folglich die Dotierungseffizienz der Protonendotierung effektiv erhöhen und/oder stabilisieren. Z.B. kann die Konzentration von Interstitialsauerstoff O_i größer sein als $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ und die Konzentration von Substitutionalkohlenstoff C_s kann niedriger sein als $1 \cdot 10^{16}$ für ein MCZ-Substrat (MCZ = Magnetfeld-induziertes Czochralski-Substrat; Magnetic-Field-Induced Czochralski).

[0072] Alternativ oder zusätzlich kann der Effekt durch eine gezielte Einstellung des Profils von Interstitialkohlenstoff C_i gesteuert werden. Z.B. kann Interstitialkohlenstoff C_i nach einer Diffusion von Substitutionalkohlenstoff C_s durch eine Bestrahlung mit Elektronen, Alphapartikeln, Helium oder Protonen erzeugt werden. Die Tiefe des maximalen Effekts kann z.B. durch die Energie der Bestrahlung gesteuert werden. Alternativ kann die Konzentration des Interstitialkohlenstoffs C_i , der in das Substrat diffundiert wird, genutzt werden, die z.B. durch die Diffusionsparameter von Kohlenstoff und die Enddicke des Substrats bestimmt werden kann.

[0073] Der Einfluss der Oberfläche als Senke für den Kohlenstoff oder während der Protonenimplantation auf die Verteilung der Interstitialsilizium-Atome kann für die Einstellung der Profilform des Interstitialkohlenstoffs C_i verwendet werden.

[0074] Z.B. können Schildkröten-förmige Dotierungsprofile (oder andere Formen) erzeugt werden (z.B. in der Driftzone) durch kombinierte Ein- und Aus-Diffusion von Kohlenstoff. Z.B. kann das Dotierungsmaximum der Driftzonendotierung ungefähr bei einer Hälfte der Tiefe der Driftzone angeordnet sein (z.B. in dem mittleren Drittel der Driftzone oder zwischen 40% und 60% der Tiefe der Driftschicht), um die Abschaltigenschaften zu verbessern. Alternativ kann das Dotierungsmaximum zu einer anderen Position der Driftzone durch eine geeignete Auswahl der Parameter der Diffusion von Kohlenstoff in das Substrat oder aus dem Substrat verschoben werden.

[0075] Z.B. kann auch ein Zielgradient der Driftzonendotierung durch Implementieren eines definierten Profils von Kohlenstoffatomen, die in das Substrat diffundiert werden, durch die Parameter der Diffusion von Kohlenstoff in das Substrat oder aus dem Substrat (z.B. Ausheil-Temperatur oder -Zeit) eingestellt werden. Z.B. kann der Abschaltprozess von Leistungshalbleitern, die Blockierfähigkeit und/oder Stabilität gegen kosmische Strahlung verbessert oder optimiert werden durch eine definierte Voreinstellung eines Gradientens für das Driftzonenprofil oder durch die Implementierung eines Schildkröten-förmigen Dotierungsprofils.

[0076] Gemäß einem Aspekt kann die Dotierungseffizienz von Protonen-induzierten Feldstoppzonen durch eine definierte Vorderseitendiffusion von Kohlenstoffatomen in das Substrat verbessert werden. Auf diese Weise kann z.B. die Welligkeit oder Ripple von Profilen von Multischritt-Feldstoppzonen, erzeugt durch mehrere Implantationen unter Verwendung mehrerer Implantationsenergien, wesentlich reduziert werden. Dies kann einerseits erklärt werden durch den graduellen Verlauf der Kohlenstoffkonzentration und die daraus folgend induzierte zusätzliche Dotierung und andererseits durch die reduzierte Leerstellenkonzentration zwischen den Dotierungsmaxima, die den Übergang von Substitutionalkohlenstoff zu Interstitialkohlenstoff wesentlich erleichtern. Ein Beispiel für ein Dotierungsprofil, das durch Kohlenstoffeinlagerung geglättet wird, ist in **Fig. 5** gezeigt.

[0077] Gemäß einem Aspekt kann die vorgeschlagene Driftzonendotierung und/oder Feldstoppdotierung innerhalb eines Materials implementiert werden, das mit Donatoratomen vordotiert ist, wie z.B. Phosphor, Arsen oder Antimon, z.B. während des Kristallwachstums oder durch Neutronentransmutationsdotierung.

[0078] Alternativ oder zusätzlich kann Kohlenstoff in das Substrat von der Wafer-Rückseite diffundiert werden. Die Diffusionskonstante des Substitutionalkohlenstoffs für größere Wafer-Durchmesser (z.B. 8" oder 12") für Dünnyafer kann zu niedrig sein, sodass der Kohlenstoff interstitial in das Substrat diffundiert werden kann und daher mit niedriger Löslichkeit. Die Diffusionskonstante von Interstitialkohlenstoff 910 überschreitet die Diffusionskonstante von Substitutionalkohlenstoff 810 um mehrere Größenordnungen (z.B. **Fig. 8** und **Fig. 9**).

[0079] Zusätzlich oder alternativ kann Kohlenstoff gezielt in eine definierte Tiefe während der Epitaxie eingelagert werden. Der Epitaxie-Prozess kann ein oder mehrere Male unterbrochen werden, um eine Vielzahl von Profilen zu erzeugen. Der Kohlenstoff kann aus der Gasphase während der Epitaxial-Abscheidung oder/und durch Kohlenstoffimplantationsschritte vor der Epitaxial-Abscheidung und/oder während der Unterbrechungen der Epitaxial-Abscheidung eingebracht werden.

[0080] Die Korrelation des Verlaufs des Dotierungsprofils mit dem Kohlenstoffgehalt an definierten Positionen des Bauelements (z.B. vertikale Profilverläufe) kann mit räumlich aufgelöster DLTS (Tiefebenen-Transienten-Spektroskopie; Deep-Level Transient Spectroscopy) und/oder IR-(Infrarot-)Messungen ausgeführt werden.

[0081] Beispiele können weiterhin ein Computerprogramm mit einem Programmcode zum Durchführen

eines der obigen Verfahren bereitstellen, wenn das Computerprogramm auf einem Computer oder Prozessor ausgeführt wird. Ein Fachmann würde leicht erkennen, dass Schritte verschiedener oben beschriebener Verfahren durch programmierte Computer durchgeführt werden können. Hierbei sollen einige Beispiele auch Programmspeichervorrichtungen, z. B. Digitaldatenspeichermedien abdecken, die maschinen- oder computerlesbar sind und maschinenausführbare oder computerausführbare Programme von Anweisungen codieren, wobei die Anweisungen einige oder alle der Handlungen der oben beschriebenen Verfahren durchführen. Die Programmspeichervorrichtungen können z. B. Digitalspeicher, magnetische Speichermedien wie beispielsweise Magnetplatten und Magnetbänder, Festplattenlaufwerke oder optisch lesbare Digitaldatenspeichermedien sein. Auch sollen die Beispiele Computer programmiert zum Durchführen der Handlungen der oben beschriebenen Verfahren oder (feld-) programmierbare Logik-Arrays ((F)PLA - (Field) Programmable Logic Arrays) oder (feld-) programmierbare Gate-Arrays ((F)PGA - (Field) Programmable Gate Arrays) programmiert zum Durchführen der Handlungen der oben beschriebenen Verfahren abdecken.

[0082] Als „Mittel für...“ (Durchführung einer gewissen Funktion) bezeichnete Funktionsblöcke sind als Funktionsblöcke umfassend Schaltungen zu verstehen, die jeweils zum Durchführen einer gewissen Funktion eingerichtet sind. Daher kann ein „Mittel für etwas“ ebenso als „Mittel eingerichtet für oder geeignet für etwas“ verstanden werden. Ein Mittel eingerichtet zum Durchführen einer gewissen Funktion bedeutet daher nicht, dass ein solches Mittel notwendigerweise die Funktion durchführt (in einem gegebenen Zeitmoment).

[0083] Funktionen verschiedener in den Figuren dargestellter Elemente einschließlich jeder als „Mittel“, „Mittel zur Bereitstellung eines Sensorsignals“, „Mittel zum Erzeugen eines Sendesignals“ usw. bezeichneter Funktionsblöcke können durch die Verwendung dedizierter Hardware wie beispielsweise „eines Signalanbieters“, „einer Signalverarbeitungseinheit“, „eines Prozessors“, „einer Steuerung“, usw. wie auch als Hardware fähig der Ausführung von Software in Verbindung mit zugehöriger Software bereitgestellt werden. Weiterhin könnte jede hier als „Mittel“ beschriebene Instanz als „ein oder mehrere Module“, „eine oder mehrere Vorrichtungen“, „eine oder mehrere Einheiten“, usw. implementiert sein oder diesem entsprechen. Bei Bereitstellung durch einen Prozessor können die Funktionen durch einen einzigen dedizierten Prozessor, durch einen einzelnen geteilten Prozessor oder durch eine Vielzahl einzelner Prozessoren bereitgestellt werden, von denen einige geteilt sein können. Weiterhin soll ausdrückliche Verwendung des Begriffs „Prozes-

sor“ oder „Steuerung“ nicht als ausschließlich auf zur Ausführung von Software fähige Hardware bezogen ausgelegt werden, und kann implizit ohne Begrenzung Digitalsignalprozessor- (DSP-) Hardware, Netzprozessor, anwendungsspezifische integrierte Schaltung (ASIC - Application Specific Integrated Circuit), feldprogrammierbare Logikanordnung (FPGA - Field Programmable Gate Array), Nurlese-speicher (ROM - Read Only Memory) zum Speichern von Software, Direktzugriffsspeicher (RAM - Random Access Memory) und nichtflüchtige Speicherung einschließen. Auch kann sonstige Hardware, herkömmliche und/oder kundenspezifische, eingeschlossen sein.

[0084] Der Fachmann sollte verstehen, dass alle hiesigen Blockschaltbilder konzeptmäßige Ansichten beispielhafter Schaltungen darstellen, die die Grundsätze der Offenbarung verkörpern. Auf ähnliche Weise versteht es sich, dass alle Ablaufdiagramme, Flussdiagramme, Zustandsübergangdiagramme, Pseudocode und dergleichen verschiedene Prozesse darstellen, die im Wesentlichen in computerlesbarem Medium dargestellt und so durch einen Computer oder Prozessor ausgeführt werden, ungeachtet dessen, ob ein solcher Computer oder Prozessor ausdrücklich dargestellt ist.

Patentansprüche

1. Ein Verfahren (100) zum Bilden eines Halbleiterbauelements, das Verfahren umfassend: Implantieren (110) einer definierten Dosis von Protonen in ein Halbleitersubstrat, wobei das Implantieren (110) der definierten Dosis von Protonen in das Halbleitersubstrat das Implantieren einer definierten Dosis von Protonen in eine Driftschichtregion des zu bildenden Halbleiterbauelements aufweist; und Tempern (120) des Halbleitersubstrats gemäß einem definierten Temperaturprofil, wobei zumindest eines der definierten Dosis von Protonen und des definierten Temperaturprofils abhängig von einem Kohlenstoff-bezogenen Parameter ausgewählt wird, der Informationen über eine Kohlenstoffkonzentration innerhalb von zumindest einem Teil des Halbleitersubstrats angibt.

2. Das Verfahren gemäß Anspruch 1, wobei die Kohlenstoffkonzentration innerhalb von zumindest einem Teil des Halbleitersubstrats höher ist als $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

3. Das Verfahren gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, ferner umfassend das Einlagern von Kohlenstoff in zumindest einen Teil des Halbleitersubstrats vor dem Implantieren (110) der definierten Dosis von Protonen.

4. Das Verfahren gemäß Anspruch 3, wobei das Einlagern des Kohlenstoffs das Implantieren von

Kohlenstoff oder Diffundieren von Kohlenstoff in zumindest einen Teil des Halbleitersubstrats aufweist.

5. Das Verfahren gemäß Anspruch 3, wobei das Einlagern des Kohlenstoffs das Diffundieren von Kohlenstoff in zumindest einen Teil des Halbleitersubstrats aufweist, wobei mehr Kohlenstoff als die Löslichkeit von Kohlenstoff bei Raumtemperatur in dem Halbleitersubstrat während des Diffusionsprozesses bereitgestellt wird.

6. Das Verfahren gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, ferner umfassend das Herausdiffundieren von Kohlenstoff aus dem Halbleitersubstrat durch Tempern des Halbleitersubstrats gemäß einem definierten Diffusionstemperaturprofil.

7. Das Verfahren gemäß Anspruch 1 oder 2, ferner umfassend das Einlagern des Kohlenstoffs während der Abscheidung einer Epitaxialschicht in den zumindest einen Teil des Halbleitersubstrats mit einer definierten Kohlenstoffverteilung.

8. Das Verfahren gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die definierte Dosis von Protonen höher ist als $1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$.

9. Das Verfahren gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, wobei das definierte Temperaturprofil eine Maximaltemperatur von weniger als 500°C aufweist.

10. Das Verfahren gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die nachfolgenden Herstellungsprozesse des Halbleiterbauelements bei Temperaturen unter 500°C nach der Implantation (110) der definierten Dosis von Protonen ausgeführt werden.

11. Das Verfahren gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, ferner umfassend das Messen einer Kohlenstoffkonzentration von zumindest einem Teil des Halbleitersubstrats oder einer Kohlenstoffkonzentration von zumindest einem Teil eines anderen Halbleitersubstrats, das zusammen mit dem Halbleitersubstrat des zu bildenden Halbleiterbauelements hergestellt wird.

12. Das Verfahren gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, ferner umfassend das Implantieren von Elektronen, Alphapartikeln, Helium oder weiteren Protonen in das Halbleitersubstrat mit einer definierten Energieverteilung, um Interstitialhalbleiteratome mit einer definierten Tiefenverteilung zu erzeugen.

13. Das Verfahren gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die definierte Dosis von Protonen in ein Halbleitersubstrat implantiert (110)

wird, um eine definierte Konzentration von Interstitialkohlenstoff in dem zumindest einem Teil des Halbleitersubstrats zu erzeugen.

14. Das Verfahren gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, ferner umfassend das Implantieren oder Diffundieren von Kohlenstoff in eine Feldstoppschichtregion des zu bildenden Halbleiterbauelements, sodass eine durchschnittliche Kohlenstoffkonzentration innerhalb der Driftschichtregion niedriger ist als eine durchschnittliche Kohlenstoffkonzentration innerhalb der Feldstoppschichtregion.

15. Das Verfahren gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, wobei der Kohlenstoff-bezogene Parameter eine C_{iO_i} -Konzentration gemessen durch eine Tiefebene-Transienten-Spektroskopie oder eine Absorptionskonstante gemessen durch Infrarotmessung ist.

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG.1

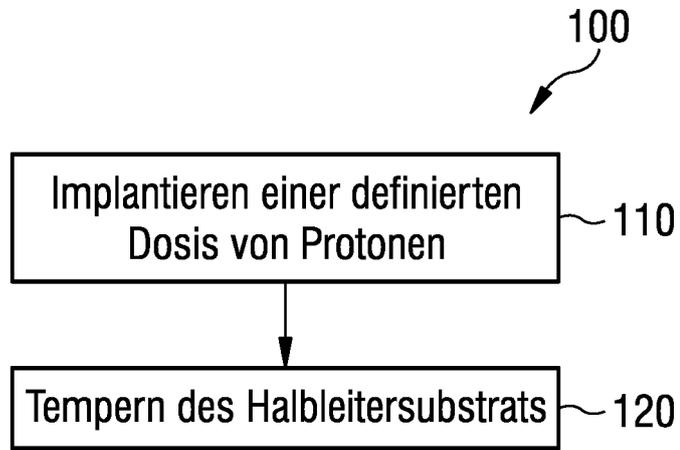


FIG.2

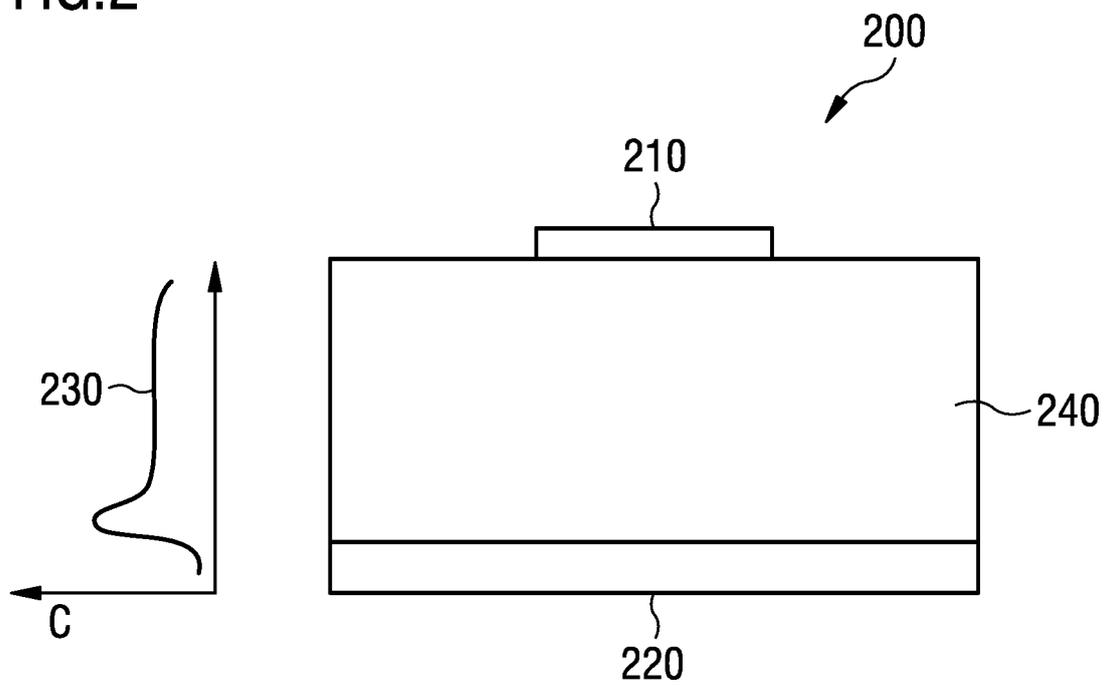


FIG. 3

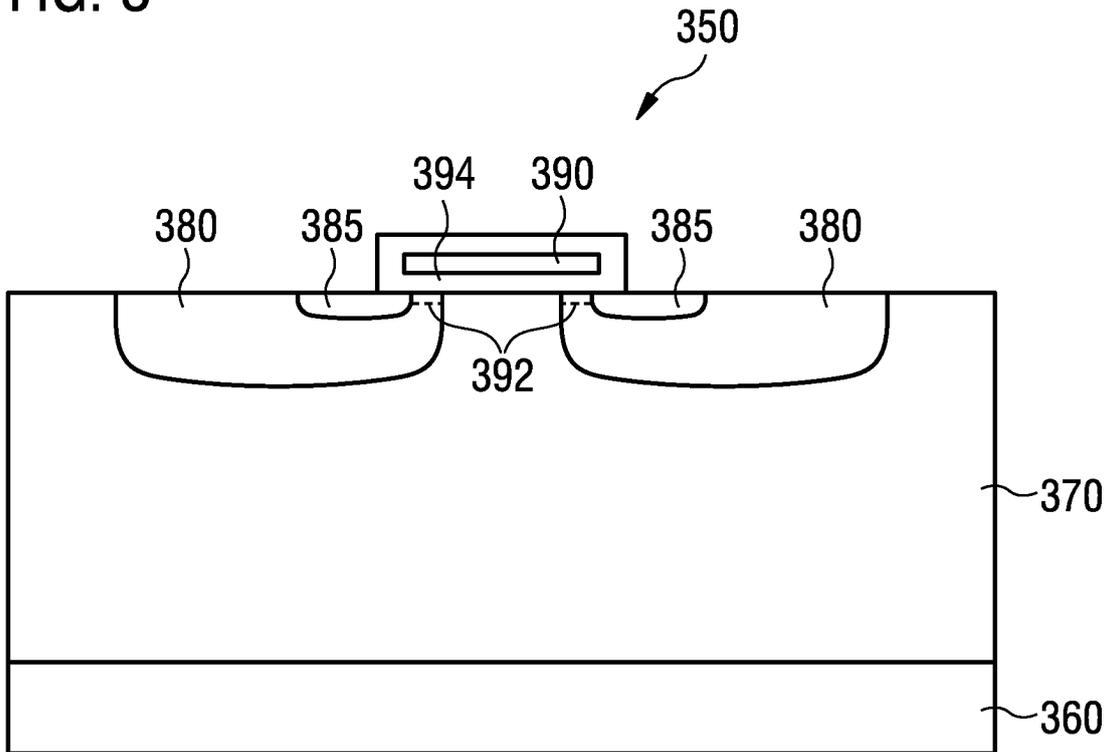
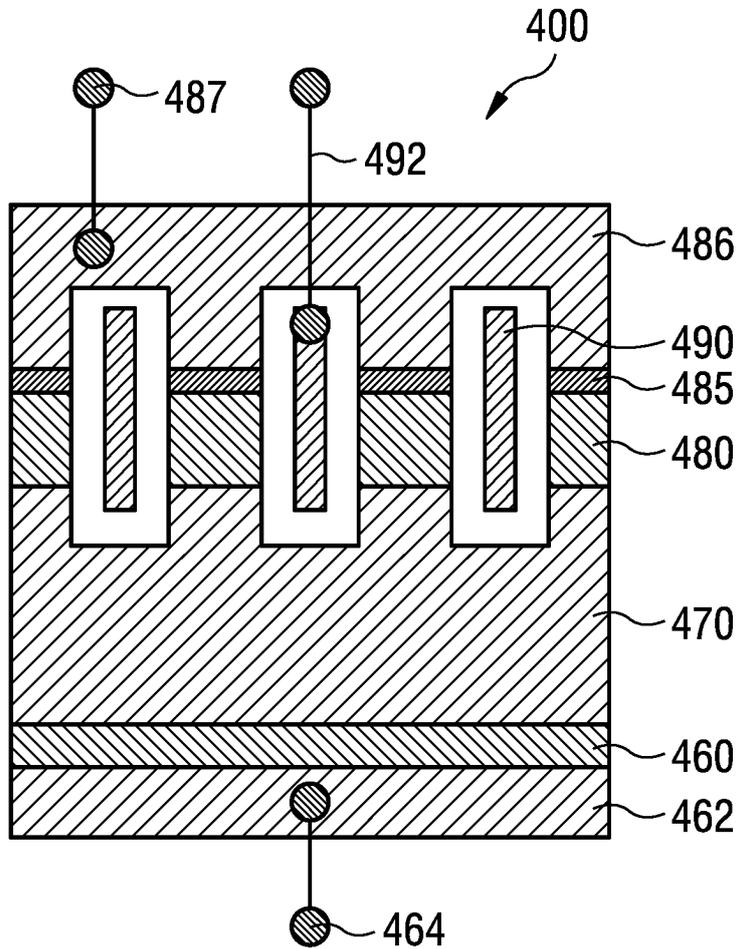


FIG. 4



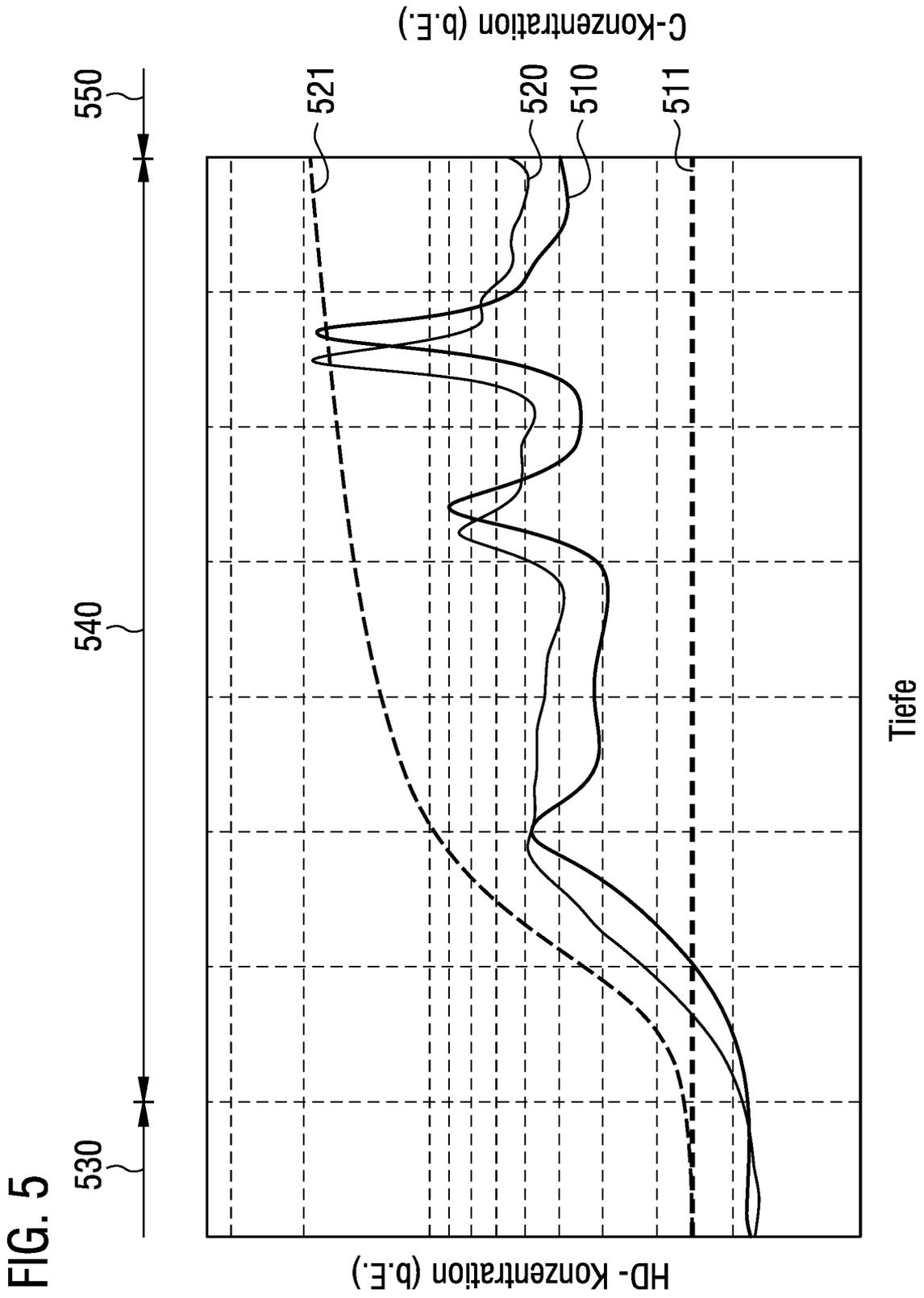


FIG. 6

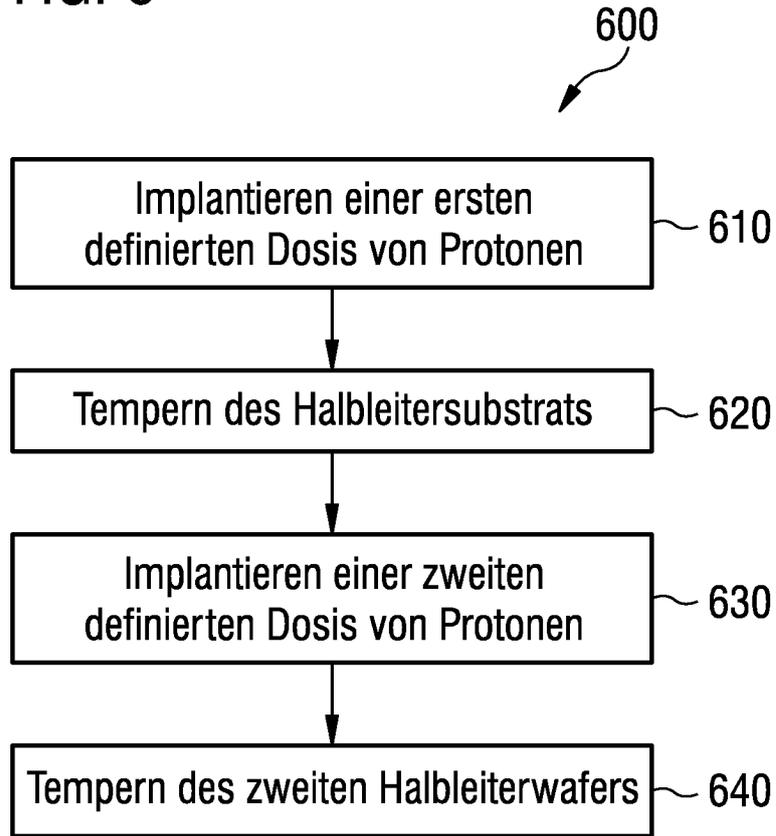


FIG. 7

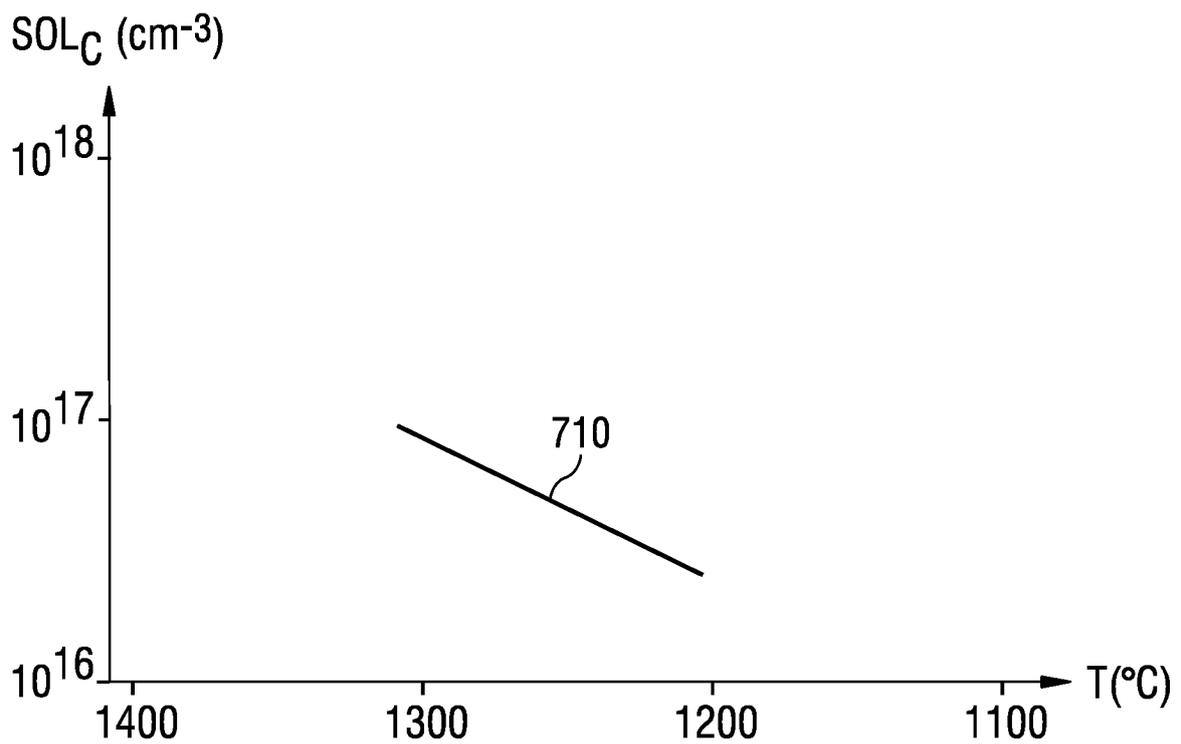


FIG. 8

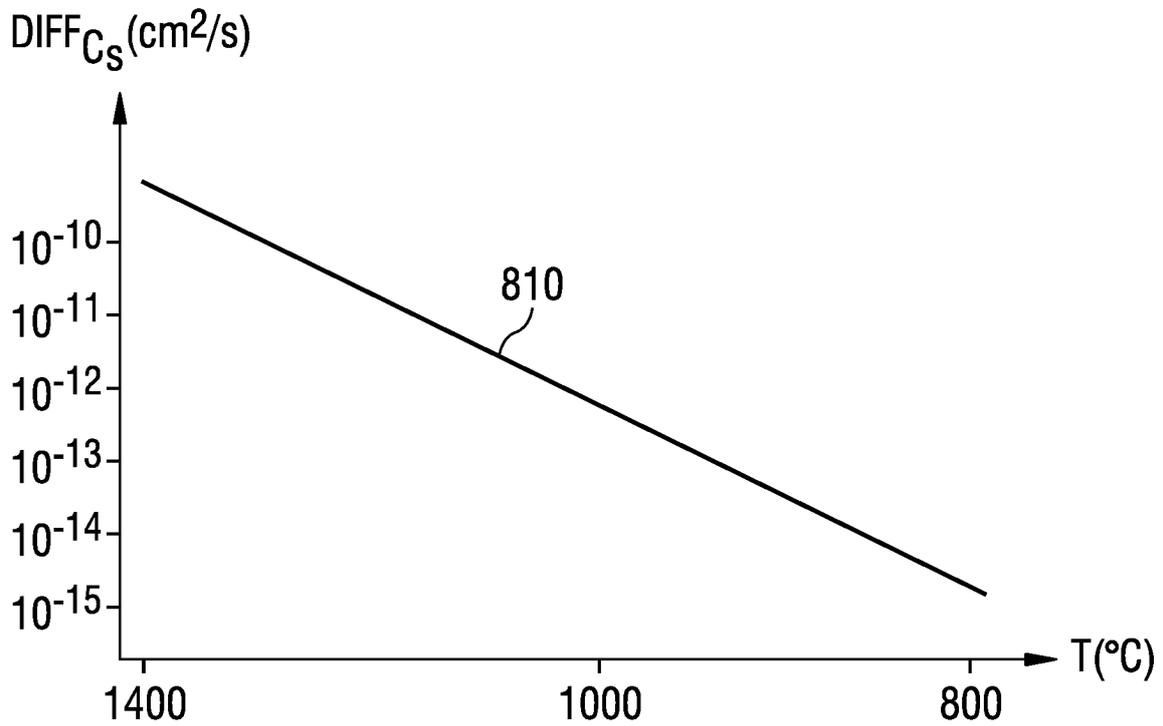


FIG. 9

