



(12)

## Patentschrift

- (21) Deutsches Aktenzeichen: 11 2013 005 409.4  
(86) PCT-Aktenzeichen: PCT/JP2013/006661  
(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: WO 2014/076945  
(86) PCT-Anmeldetag: 12.11.2013  
(87) PCT-Veröffentlichungstag: 22.05.2014  
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung  
in deutscher Übersetzung: 13.08.2015  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 01.02.2024

- (51) Int Cl.: **H01L 21/322 (2006.01)**  
**C23C 16/02 (2006.01)**  
**C23C 16/24 (2006.01)**  
**C30B 25/20 (2006.01)**  
**H01L 21/20 (2006.01)**  
**H01L 21/205 (2006.01)**  
**H01L 21/265 (2006.01)**  
**H01L 27/14 (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).

(30) Unionspriorität:  
**2012-249598** 13.11.2012 JP

(72) Erfinder:  
**Kadono, Takeshi, Tokyo, JP; Kurita, Kazunari,  
Tokyo, JP**

(73) Patentinhaber:  
**SUMCO CORPORATION, Tokyo, JP**

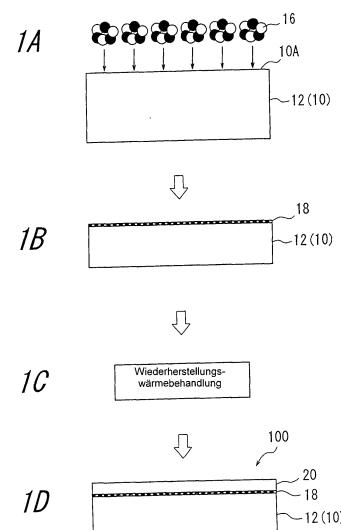
(56) Ermittelter Stand der Technik:  
**siehe Folgeseiten**

(74) Vertreter:  
**Kraus & Lederer PartGmbB, 80539 München, DE**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Herstellung von Halbleiter-Epitaxiewafern, Halbleiter-Epitaxiewafer, und Verfahren  
zur Herstellung von Festkörper-Bildsensorvorrichtungen**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur Herstellung eines Halbleiter-Epitaxiewafers (100, 200), umfassend:  
einen ersten Schritt des Bestrahls eines Halbleiter-Wafers (10, 12) mit Cluster-Ionen (16), wodurch eine Modifizierungsschicht (18) aus einem konstituierenden Element der Cluster-Ionen (16), enthalten als feste Lösung, in einem Oberflächenbereich (10A) des Halbleiter-Wafers (10, 12) gebildet wird;  
einen zweiten Schritt der Durchführung einer Wärmebehandlung zur Wiederherstellung der Kristallinität an dem Halbleiter-Wafer (10, 12) nach dem ersten Schritt, so dass der Trübungswert des Oberflächenbereichs (10A) des Halbleiter-Wafers (10, 12) 0,20 ppm oder weniger ist, wobei der Trübungswert definiert ist als der Mittelwert des erhaltenen Trübungswerts der Oberfläche des Halbleiter-Wafers (10, 12), gemessen mit der Oberflächendefekt-Inspektionsvorrichtung SP-1 von KLA-Tencor Corporation, im „DWN“-Modus; und  
einen dritten Schritt des Bildens einer Silicium-Epitaxieschicht (20) auf der Modifizierungsschicht (18) des Halbleiter-Wafers (10, 12) durch chemische Dampfabscheidung (CVD) nach dem zweiten Schritt;  
wobei der zweite Schritt unter folgenden Bedingungen durchgeführt wird:  
(i) als Wasserstoff-Backen in einer epitaxialen Vorrichtung zur Bildung einer epitaxialen Halbleiterschicht, wobei die Haltetemperatur 1100 °C bis 1200 °C ist und die Haltezeit 1 Minute oder mehr ist, oder

(ii) als Wärmebehandlung mit einer schnellen Erwärmungsvorrichtung, die getrennt ist von der epitaxialen Vorrichtung, wobei die Backtemperatur 900 °C bis 1200 °C ist und die Backzeit 10 s bis 1 h ist.



(19)



Deutsches  
Patent- und Markenamt

(10) DE 11 2013 005 409 B4 2024.02.01

(56) Ermittelter Stand der Technik:

US                    2012 / 0 104 565     A1  
JP                    2010- 40 864     A

RUDAWSKI, N. G. [et al.]: Amorphization and Solid-Phase Epitaxial Growth of C-Cluster Ion-Implanted Si. In: Journal of Electronic Materials, Vol. 38, 2009, No. 9, S. 1926 - 1930.

**Beschreibung****TECHNISCHES GEBIET**

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung eines Halbleiter-Epitaxiewafers, einen Halbleiter-Epitaxiewafer und ein Verfahren zur Herstellung einer Festkörper-Bildsensorvorrichtung. Die vorliegende Erfindung bezieht sich insbesondere auf ein Verfahren zur Herstellung eines Halbleiter-Epitaxiewafers, wobei der Wafer Metallverunreinigungen durch das Erreichen höherer Getterfähigkeit unterdrücken kann und der Trübungswert eines Oberflächenbereichs einer Epitaxieschicht des Wafers reduziert ist.

**HINTERGRUND**

**[0002]** Metallkontamination ist einer der Faktoren, die die Eigenschaften einer Halbleitervorrichtung verschlechtern. Zum Beispiel bei einer von hinten beleuchteten Festkörper-Bildsensorvorrichtung verursacht Metall, das eingemischt ist in einen Halbleiter-Epitaxiewafer, der ein Substrat der Vorrichtung sein soll, erhöhten Dunkelstrom in der Festkörper-Bildsensorvorrichtung und resultiert in der Bildung von Defekten, die als „weiße Punktfehler“ bezeichnet werden. In den letzten Jahren sind von hinten beleuchtete Festkörper-Bildsensorvorrichtungen weit verwendet worden in digitalen Videokameras und Mobiltelefonen wie Smartphones, da sie Licht direkt von außen empfangen können und schärfere Bilder oder bewegte Bilder auch an dunklen Orten und dergleichen aufnehmen können aufgrund der Tatsache, dass eine Verdrahtungsschicht und dergleichen davon an einer unteren Schicht als ein Sensorabschnitt angeordnet sind. Daher ist es wünschenswert, weiße Punktfehler so weit wie möglich zu reduzieren.

**[0003]** Das Einmischen von Metall in einen Wafer tritt hauptsächlich auf bei einem Verfahren zur Herstellung eines Halbleiter-Epitaxiewafers und einem Verfahren zur Herstellung einer Festkörper-Bildsensorvorrichtung (Vorrichtungs-Herstellungsverfahren). Metallverunreinigung in dem ersten Verfahren zur Herstellung eines Halbleiter-Epitaxiewafers kann verursacht sein durch Schwermetallpartikel von Komponenten eines Epitaxiewachstumsöfens, oder Schwermetallpartikel von der Metallkorrosion von Rohrmaterialien des Ofens aufgrund von Gas auf Chlorbasis, das während des epitaxialen Wachstums in dem Ofen verwendet wird. In den letzten Jahren sind solche Metallverunreinigungen zu einem gewissen Grad durch Ersetzen von Komponenten von Epitaxiewachstumsöfen durch hochkorrosionsbeständige Materialien reduziert worden, aber nicht in ausreichendem Maße. Andererseits würde in dem letzteren Verfahren zur Herstellung einer Festkörper-Bildsensorvorrichtung Schwermetallverunreinigung von Halbleiter-Substraten auftreten in den Verfahrensschritten wie Ionenimplantation, Diffusion und oxidierende Wärmebehandlung in dem Herstellungsverfahren.

**[0004]** Aus diesen Gründen ist konventionellerweise Schwermetallverunreinigung von Halbleiter-Epitaxiewafern verhindert worden durch Bildung in dem Halbleiter-Wafer einer Getter-Senke zum Einfangen des Metalls oder durch Verwendung eines Substrats mit einer hohen Fähigkeit, das Metall einzufangen (Getterfähigkeit), wie etwa ein Substrat mit hoher Borkonzentration.

**[0005]** Im allgemeinen wird eine Getter-Senke gebildet in einem Halbleiter-Wafer durch ein Verfahren der intrinsischen Getterung (IG), bei dem eine Sauerstoffabscheidung (üblicherweise bezeichnet als Siliciumoxidabscheidung und auch bezeichnet als Bulk-Mikrodefekt (BMD)) oder eine Dislokation, die Kristaldefekte sind, gebildet wird innerhalb des Halbleiter-Wafers, oder durch ein Verfahren der extrinsischen Getterung (EG), bei dem die Getter-Senke auf der Rückfläche des Halbleiter-Wafers gebildet wird.

**[0006]** Hier kann eine Technik zum Ausbilden einer Einfangstelle in einem Halbleiter-Wafer durch Implantation von Monomer-Ionen (Einzelionen) als eine Technik zum Gettern von Schwermetall angegeben werden. JP H06- 338 507 A offenbart ein Herstellungsverfahren, durch das Kohlenstoffionen durch eine Oberfläche eines Siliciumwafers implantiert werden, um einen Kohlenstoffionenimplantationsbereich zu bilden, und eine epitaxiale Siliciumschicht auf der Oberfläche gebildet wird, wodurch ein epitaxialer Siliciumwafer erhalten wird. Bei dieser Technik dient der Kohlenstoffionenimplantationsbereich als eine Einfangstelle.

**[0007]** Ferner beschreibt JP 2008- 294 245 A eine Technik zur Bildung einer Kohlenstoffimplantationsschicht durch Implantieren von Kohlenstoffionen in einen Siliciumwafer; anschließendes Durchführen einer Wärmebehandlung zur Wiederherstellung der Kristallinität, die durch die Ionenimplantation verschlechtert wurde, (im folgenden als „Wiederherstellungswärmebehandlung“ bezeichnet) auf dem Wafer, unter Verwendung einer RTA- (Rapid Thermal Annealing) Vorrichtung, wodurch die Wiederherstellungswärmebehandlung verkürzt wird; und anschließendes Ausbilden einer Silicium-Epitaxieschicht.

**[0008]** Ferner beschreibt JP 2010- 177 233 A ein Verfahren zur Herstellung eines epitaxialen Wafers, wobei ein Silicium-Einkristall-Substrat ionen-implantiert wird mit wenigstens einem Element aus Bor, Kohlenstoff, Aluminium, Arsen und Antimon in einer Dosis im Bereich von  $5 \times 10^{14}$  Atome / cm<sup>2</sup> bis  $1 \times 10^{16}$  Atome / cm<sup>2</sup>, und nach der Reinigung, die ohne eine Wiederherstellungswärmebehandlung des Silicium-Einkristall-Substrats ausgeführt wird, wird eine Epitaxieschicht bei einer Temperatur von 1100 °C oder mehr unter Verwendung einer Einzel-Wafer-Verarbeitungs-Epitaxie-Apparatur gebildet.

**[0009]** RUDAWSKI, N. G. [et al.]: Amorphization and Solid-Phase Epitaxial Growth of C-Cluster Ion-Implanted Si. In: Journal of Electronic Materials, Vol. 38, 2009, No. 9, S. 1926 - 1930 beschreiben die Amorphisierung und das festphasige epitaktische Wachstum von C-Cluster-ionenimplantiertem Si.

**[0010]** Die JP 2010- 040 864 A betrifft das Problem der Bereitstellung eines epitaktischen Siliziumwafers, der eine hohe Getterfähigkeit aufweist, selbst wenn ein integriertes Schaltungssubstrat ausgedünnt ist. Zur Lösung dieses Problems beschreibt die Druckschrift einen epitaktischen Siliziumwafer, der eine epitaktische Siliziumschicht auf einer Hauptoberfläche eines Silizium-Einkristallsubstrats aufweist. In dem Silizium-Einkristallsubstrat und der Silizium-Epitaxieschicht werden eine erste Schicht, die zumindest ein Nicht-Träger-Dotiermittel enthält, und eine zweite Schicht, die ein Nicht-Träger-Dotiermittel enthält, gebildet.

**[0011]** Die US 2012 / 0 104 565 A1 beschreibt einen Epitaxiewafer und ein Verfahren zu seiner Herstellung. Darin wird ausgeführt: Wenn ein gemischtes Gas aus Trichlorsilan und Dichlorsilan als Quellgas verwendet wird, wird eine Siliziumschicht auf einer Oberfläche eines Siliziumwafers in einem Temperaturbereich von 1000 bis 1100 °C, vorzugsweise 1040 bis 1080 °C, epitaktisch aufgewachsen. Wenn Dichlorsilan als Quellgas verwendet wird, wird eine Siliziumschicht auf einer Oberfläche eines Siliziumwafers in einem Temperaturbereich von 900 bis 1150 °C epitaktisch aufgewachsen, vorzugsweise 1000 bis 1150 °C. Auf diese Weise kann ein Silizium-Epitaxiewafer erhalten werden, der einen geringen Trübunggrad, eine ausgezeichnete Ebenheit (Kantenabrollung) und eine verringerte Orientierungsabhängigkeit der Epitaxiewachstumsrate aufweist und in der Lage ist, auf die höhere Integration von Halbleiterbauelementen zu reagieren, und dieser Epitaxiewafer kann in großem Umfang bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen verwendet werden.

## ZUSAMMENFASSUNG

**[0012]** Bei allen in JP H06- 338 507 A, JP 2008- 294 245 A und JP 2010- 177 233 A beschriebenen Verfahren, werden Monomer-Ionen vor der Bildung einer Epitaxieschicht in einen Halbleiter-Wafer implantiert. Nach Untersuchungen der Erfinder der vorliegenden Erfindung wurde jedoch gefunden, dass die Getterfähigkeit unzureichend ist in Halbleiter-Epitaxiewafern, die einer Monomer-Ionenimplantation unterzogen wurden, und stärkere Getterfähigkeit erwünscht ist.

**[0013]** Ferner ist es, um eine qualitativ hochwertige Halbleitervorrichtung aus einem Halbleiter-Epitaxiewafer zu erhalten, wichtig, dass die Flachheit der Oberfläche einer Epitaxieschicht hoch ist (der Trübungswert niedrig ist).

**[0014]** Im Hinblick auf die obigen Probleme ist es eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung bereitzustellen: einen Halbleiter-Epitaxiewafer mit höherer Getterfähigkeit und reduziertem Trübungswert der Oberfläche einer Halbleiter-Epitaxieschicht, ein Verfahren zur Herstellung des Halbleiter-Epitaxiewafers und ein Verfahren zur Herstellung einer Festkörper-Bildsensorvorrichtung, durch das eine Festkörper-Bildsensorvorrichtung aus dem Halbleiter-Epitaxiewafer gebildet wird.

**[0015]** Nach den Untersuchungen durch die Erfinder der vorliegenden Erfindung wurde gefunden dass Bestrahlung eines Halbleiter-Wafers mit Cluster-Ionen vorteilhaft ist in den folgenden Punkten im Vergleich mit dem Fall des Implantierens von Monomer-Ionen. Genauer gesagt, selbst wenn die Bestrahlung mit Cluster-Ionen mit einer Beschleunigungsspannung durchgeführt wird, die äquivalent ist zu dem Fall der Monomer-Ionenimplantation, ist die Energie pro einem Atom oder einem Molekül, die auf den bestrahlten Halbleiter-Wafer aufgebracht wird, niedriger als im Fall der Monomer-Ionenimplantation. Dies führt zu höherer Spitzenkonzentration in dem Tiefenrichtungsprofil des Bestrahlungselements und ermöglicht es, dass sich die Spitzenposition der Oberfläche des Halbleiter-Wafers annähert. Somit wurde gefunden, dass sich die Getterfähigkeit verbessert. Außerdem kann, da die Bestrahlung bei der Cluster-Ionenbestrahlung mit einem Aggregat aus einer Vielzahl von Atomen oder Molekülen durchgeführt wird, die Kristallinität der äußersten Oberfläche des Halbleiter-Wafer in Abhängigkeit von der Größe oder der Dosis der verwendeten Cluster-Ionen verschlechtert werden, was zur Verschlechterung der Ebenheit (Erhöhung des Trübungswerts) der Epitaxieschichtoberfläche führen würde. Entsprechend wurde festgestellt, dass, wenn eine Wiederherstellungs-

wärmebehandlung nach der Cluster-Ionenbestrahlung durchgeführt wird, um den Trübungswert des Oberflächenbereichs des Halbleiter-Wafers auf ein bestimmtes Niveau wiederherzustellen, und dann eine Epitaxieschicht gebildet wird; der Trübungswert des Epitaxieschicht-Oberflächenbereichs ausreichend verringert werden kann.

**[0016]** Auf der Grundlage der obigen Feststellungen vollendeten die Erfinder die vorliegende Erfindung. Diese stellt das Verfahren zur Herstellung eines Halbleiter-Epitaxiewafers gemäß Anspruch 1, den Halbleiter-Epitaxiewafer gemäß Anspruch 7 und das Verfahren zur Herstellung einer Festkörper-Bildsensorvorrichtung gemäß Anspruch 14 bereit.

**[0017]** Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zur Herstellung eines Halbleiter-Epitaxiewafers kann der Halbleiter-Wafer ein Siliciumwafer sein.

**[0018]** Ferner kann der Halbleiter-Wafer bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zur Herstellung eines Halbleiter-Epitaxiewafers ein epitaxialer Siliciumwafer sein, in dem eine epitaxiale Siliciumschicht auf einer Oberfläche eines Siliciumwafers gebildet ist. In diesem Fall wird die Modifizierungsschicht in dem Oberflächenbereich der epitaxialen Siliciumschicht in dem ersten Schritt gebildet.

**[0019]** Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zur Herstellung eines Halbleiter-Epitaxiewafers enthalten die Cluster-Ionen bevorzugt Kohlenstoff als konstituierendes Element. Mehr bevorzugt enthalten die Cluster-Ionen mindestens zwei Arten von Elementen einschließlich Kohlenstoff als konstituierende Elemente.

**[0020]** Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zur Herstellung eines Halbleiter-Epitaxiewafers ist die Dosis der Cluster-Ionen aus Kohlenstoff bevorzugt  $2,0 \times 10^{14}$  Atome / cm<sup>2</sup> oder mehr.

**[0021]** Der erfindungsgemäße Halbleiter-Epitaxiewafer kann ein Siliciumwafer sein.

**[0022]** Ferner kann der erfindungsgemäße Halbleiter-Wafer ein epitaxialer Siliciumwafer sein, in dem eine epitaxiale Siliciumschicht auf einer Oberfläche eines Siliciumwafers gebildet ist. In diesem Fall ist die Modifizierungsschicht im Oberflächenbereich der epitaxialen Siliciumschicht angeordnet.

**[0023]** Darüber hinaus liegt bei dem erfindungsgemäßen Halbleiter-Epitaxiewafer der Spitzenwert des Konzentrationsprofils in der Modifizierungsschicht bevorzugt in einer Tiefe innerhalb von 150 nm von der Oberfläche des Halbleiter-Wafers. Die Spitzenkonzentration des Konzentrationsprofils in der Modifizierungsschicht ist bevorzugt  $1 \times 10^{15}$  Atome / cm<sup>3</sup> oder mehr.

**[0024]** Bei dem erfindungsgemäßen Halbleiter-Epitaxiewafer umfasst das bestimmte Element bevorzugt Kohlenstoff. Mehr bevorzugt umfasst das bestimmte Element mindestens zwei Arten von Elementen einschließlich Kohlenstoff.

#### Vorteilhafte Wirkung der Erfindung

**[0025]** Gemäß der vorliegenden Erfindung wird ein Halbleiter-Wafer mit Cluster-Ionen bestrahlt, um eine Modifizierungsschicht aus einem konstituierenden Element der Cluster-Ionen, enthalten als festen Lösung, in einem Oberflächenbereich des Halbleiter-Wafers zu bilden, und dann wird eine Wärmebehandlung zur Wiederherstellung des Trübungswertes des Halbleiter-Waferoberflächenbereichs an dem Halbleiter-Wafer durchgeführt, was zu einem Halbleiter-Epitaxiewafer führt, wobei der Wafer Metallkontamination durch das Erreichen höherer Getterfähigkeit unterdrücken kann und der Trübungswert des Oberflächenbereichs einer Epitaxieschicht des Wafers vermindert ist; und eine Festkörper-Bildsensorvorrichtung hoher Qualität kann aus dem Halbleiter-Epitaxiewafer gebildet werden.

#### KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

**Fig. 1 (A)** bis **Fig. 1 (D)** sind schematische Querschnittsansichten, die ein Verfahren zur Herstellung eines Halbleiter-Epitaxiewafers 100 gemäß einer ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung darstellen.

**Fig. 2 (A)** bis **Fig. 2 (E)** sind schematische Querschnittsansichten, die ein Verfahren zur Herstellung eines Halbleiter-Epitaxiewafers 200 nach einer anderen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung darstellen.

**Fig. 3 (A)** ist eine schematische Ansicht, die den Bestrahlungsmechanismus zum Bestrahlen mit Cluster-Ionen darstellt. **Fig. 3 (B)** ist eine schematische Ansicht, die den Implantationsmechanismus zum Implantieren eines Monomer-Ions darstellt.

**Fig. 4** zeigt das Konzentrationsprofil von Kohlenstoff, erhalten durch SIMS-Analyse in den Referenzbeispielen 1 und 2.

**Fig. 5 (A)** und **Fig. 5 (B)** sind Diagramme, die das Kohlenstoffkonzentrationsprofil eines epitaxialen Siliciumwafers mit dem Ni-Konzentrationsprofil nach der Bewertung der Getterfähigkeit in Beispiel 1 und Vergleichsbeispiel 4 zeigen.

#### DETAILLIERTE BESCHREIBUNG

**[0026]** Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung werden nun im Detail unter Bezugnahme auf die Zeichnungen beschrieben. Im Prinzip werden die gleichen Komponenten mit den gleichen Bezugszeichen bezeichnet, und die Beschreibung wird nicht wiederholt. Ferner sind in **Fig. 1 (A)** bis **Fig. 1 (D)** und **Fig. 2 (A)** bis **Fig. 2 (E)**, eine erste Epitaxieschicht 14 und eine zweite Epitaxieschicht 20 übertrieben dargestellt in Bezug auf einen Halbleiter-Wafer 10 in der Dicke für die Zwecke der Erläuterung, so dass das Dickenverhältnis nicht dem tatsächlichen Verhältnis entspricht.

#### Verfahren zur Herstellung von Halbleiter-Epitaxiewafern

**[0027]** Ein Verfahren zur Herstellung eines Halbleiter-Epitaxiewafers 100 gemäß einer ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung umfasst, wie in den **Fig. 1 (A)** bis **Fig. 1 (D)** gezeigt, einen ersten Schritt (**Fig. 1 (A)** und **Fig. 1 (B)**) des Bestrahls eines Halbleiter-Wafers 10 mit Cluster-Ionen 16, um eine Modifizierungsschicht 18 aus einem konstituierenden Element der Cluster-Ionen 16 in einem Oberflächenbereich 10A des Halbleiter-Wafers 10 zu bilden; einen zweiten Schritt (**Fig. 1 (C)**) der Durchführung einer Wärmebehandlung zur Wiederherstellung der Kristallinität (Wiederherstellungswärmebehandlung) an dem Halbleiter-Wafer 10, so dass der Trübungswert des Oberflächenbereichs 10A des Halbleiter-Wafers 10 0,20 ppm oder weniger ist; und einen dritten Schritt (**Fig. 1 (D)**) des Bildens einer Silicium-Epitaxieschicht 20 auf der Modifizierungsschicht 18 des Halbleiter-Wafers 10. **Fig. 1 (D)** ist eine schematische Querschnittsansicht des durch dieses Herstellungsverfahren erhaltenen Halbleiter-Epitaxiewafers 100.

**[0028]** Beispiele für der Halbleiter-Wafer 10 umfassen, beispielsweise einen Volumen-Einkristallwafer einschließlich Silicium oder einen Verbundhalbleiter (GaAs, GaN oder SiC) ohne Epitaxieschicht auf der Oberfläche davon. Im Fall der Herstellung einer von hinten beleuchteten Festkörper-Bildsensorvorrichtung wird ein Volumen-Einkristallsiliciumwafer typischerweise verwendet. Ferner kann der Halbleiter-Wafer 10 durch Züchten eines Einkristall-Siliciumblocks durch das Czochralski-Verfahren (CZ-Verfahren) oder das Schmelzen unter Bezojen (FZ-Verfahren) und das Schneiden mit einer Drahtsäge oder dergleichen hergestellt werden. Ferner können Kohlenstoff und / oder Stickstoff zugegeben werden, um höhere Getterfähigkeit zu erzielen. Weiterhin kann der Halbleiter-Wafer 10 vom n-Typ oder p-Typ hergestellt werden durch Zugabe eines gegebenen Verunreinigungs-Dotierungsmittels. Die erste Ausführungsform in den **Fig. 1 (A)** bis **Fig. 1 (D)** ist ein Beispiel unter Verwendung eines Volumen-Halbleiter-Wafers 12 ohne Epitaxieschicht auf dessen Oberfläche als der Halbleiter-Wafer 10.

**[0029]** Alternativ kann ein Halbleiter-Epitaxiewafer, in dem eine epitaxiale Halbleiterschicht (erste Epitaxieschicht) 14 auf einer Oberfläche des Volumen-Halbleiter-Wafer 12 gebildet ist, wie in **Fig. 2 (A)** gezeigt, als ein Beispiel für den Halbleiter-Wafer 10 angegeben werden. Ein Beispiel ist ein epitaxialer Siliciumwafer, in dem eine epitaxiale Siliciumschicht auf der Oberfläche eines Volumen-Einkristallsiliciumwafers gebildet ist. Die epitaxiale Siliciumschicht kann durch chemische Dampfabscheidung (CVD) unter typischen Bedingungen hergestellt werden. Die erste Epitaxieschicht 14 hat bevorzugt eine Dicke im Bereich von 0,1 µm bis 10 µm, mehr bevorzugt im Bereich von 0,2 µm bis 5 µm.

**[0030]** Ein Verfahren zur Herstellung eines Halbleiter-Epitaxiewafers 200 gemäß einer zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung umfasst, wie in den **Fig. 2 (A)** bis **Fig. 2 (E)** gezeigt, einen ersten Schritt (**Fig. 2 (A)** bis **Fig. 2 (C)**) des Bestrahls eines Halbleiter-Wafers 10, bei dem eine erste Epitaxieschicht 14 auf einer Oberfläche (auf mindestens einer Seite) des Volumen-Halbleiter-Wafers 12 gebildet ist, mit Cluster-Ionen 16, um eine Modifizierungsschicht 18 aus einem konstituierenden Element der Cluster-Ionen 16 in einem Oberflächenbereich 10A des Halbleiter-Wafers (dem Oberflächenbereich der ersten Epitaxieschicht 14 in dieser Ausführungsform) zu bilden; einen zweiten Schritt (**Fig. 2 (D)**) der Durchführung einer Wärmebehandlung zur Wiederherstellung der Kristallinität (Wiederherstellungswärmebehandlung) an dem Halbleiter-

Wafer 10, so dass der Trübungswert des Oberflächenbereichs 10A des Halbleiter-Wafers 0,20 ppm oder weniger ist; und einen dritten Schritt (**Fig. 2 (E)**) des Bildens einer Silicium-Epitaxieschicht 20 auf der Modifizierungsschicht 18 des Halbleiter-Wafers 10. **Fig. 2 (E)** ist eine schematische Querschnittsansicht des durch dieses Herstellungsverfahren erhaltenen Halbleiter-Epitaxiewafers 200.

**[0031]** Dabei ist der in **Fig. 1 (A)** und **Fig. 2 (B)** gezeigte Schritt der Bestrahlung mit Cluster-Ionen einer der charakteristischen Schritte der vorliegenden Erfindung. Die technische Bedeutung der Verwendung des charakteristischen Schritts wird mit der Arbeitsweise und Wirkung beschrieben. Die Modifizierungsschicht 18, gebildet als Ergebnis der Bestrahlung mit den Cluster-Ionen 16, ist eine Region, wo das konstituierende Element der Cluster-Ionen 16 lokalisiert ist als feste Lösung in interstitiellen Kristallpositionen oder Substitutionspositionen in dem Kristallgitter des Oberflächenbereichs des Halbleiter-Wafers, welche Region als ein Einfangstelle fungiert. Der Grund kann wie folgt sein. Nach der Bestrahlung in der Form von Cluster-Ionen werden Elemente wie Kohlenstoff und Bor in hoher Dichte an Substitutionspositionen und Zwischenpositionen in dem Silicium-Einkristall lokalisiert. Es wurde experimentell gefunden, dass, wenn Kohlenstoff und Bor umgewandelt werden in feste Lösungen zu der Gleichgewichtskonzentration des Siliciumeinkristalls oder höher, sich die feste Löslichkeit der Schwermetalle (Sättigungslöslichkeit von Übergangsmetall) extrem erhöht. Mit anderen Worten scheint es, dass Kohlenstoff und Bor, umgewandelt in eine feste Lösung zu der Gleichgewichtskonzentration oder höher, die Löslichkeit von Schwermetallen erhöhen, was zu einer deutlich erhöhten Rate des Einfangens der Schwermetalle führt.

**[0032]** Hierbei kann, da die Bestrahlung in der vorliegenden Erfindung mit den Cluster-Ionen 16 ausgeführt wird, eine höhere Getterfähigkeit erreicht werden im Vergleich mit dem Fall des Implantierens von Monomer-Ionen. Daher können die Halbleiter-Epitaxiewafer 100 und 200 hergestellt werden, die eine höherer Getterfähigkeit erreichen, und die Bildung von weißen Punktdefekten in von hinten beleuchteten Festkörper-Bildsen-sorvorrichtungen, die aus den durch die Herstellungsverfahren erhaltenen Halbleiter-Epitaxiewafer 100 und 200 hergestellt werden, wird voraussichtlich unterdrückt im Vergleich zu den herkömmlichen Vorrichtungen.

**[0033]** Man beachte, dass „Cluster-Ionen“ hier Cluster bedeutet, die gebildet werden durch Aggregation einer Mehrzahl von Atomen oder Molekülen, die ionisiert worden sind, indem sie positiv oder negativ geladen werden. Ein Cluster ist eine Volumen-Aggregat mit einer Mehrzahl (typischerweise 2 bis 2000) von Atome oder Molekülen, die miteinander verbunden sind.

**[0034]** Die Erfinder der vorliegenden Erfindung erwägen, dass der Mechanismus der Erzielung einer hohen Getterfähigkeit durch die Bestrahlung mit den Cluster-Ionen wie folgt ist.

**[0035]** Wenn beispielsweise Kohlenstoff-Monomer-Ionen implantiert werden in einen Siliciumwafer, sputtern die Monomer-Ionen Siliciumatome, die den zu implantierenden Siliciumwafer bilden, zu einer vorbestimmten Tiefenposition in dem Siliciumwafer, wie in **Fig. 3 (B)** gezeigt. Die Implantationstiefe hängt von der Art der konstituierenden Elemente der Implantations-Ionen und der Beschleunigungsspannung der Ionen ab. In diesem Fall ist das Konzentrationsprofil von Kohlenstoff in der Tiefenrichtung des Siliciumwafers relativ breit und der Kohlenstoff-implantierte Bereich erstreckt sich etwa 0,5 µm bis 1 µm. Wenn die Implantation gleichzeitig mit einer Vielzahl von Arten von Ionen bei der gleichen Energie durchgeführt wird, werden leichtere Elemente tiefer implantiert, mit anderen Worten, die Elemente werden in Abhängigkeit von ihrer Masse an verschiedenen Positionen implantiert. Dementsprechend ist das Konzentrationsprofil der implantierten Elemente breiter in einem solchen Fall.

**[0036]** Andererseits werden in Fällen, in denen der Siliciumwafer mit Cluster-Ionen bestrahlt wird, beispielsweise bestehend aus Kohlenstoff und Bor, wie in **Fig. 3 (A)** gezeigt, wenn der Siliciumwafer mit den Cluster-Ionen 16 bestrahlt wird, die Ionen sofort zu einem Hochtemperaturzustand von etwa 1350 °C bis 1400 °C gemacht aufgrund der Bestrahlungsenergie, wodurch Silicium schmilzt. Danach wird das Silicium rasch abgekühlt, um eine feste Lösung von Kohlenstoff und Bor in der Nähe der Oberfläche des Siliciumwafers zu bilden. Entsprechend bedeutet eine „Modifizierungsschicht“ hier eine Schicht, in der die konstituierenden Elemente der für die Bestrahlung verwendeten Ionen eine feste Lösung bei interstitiellen Kristallpositionen oder Substitutionspositionen in dem Kristallgitter des Oberflächenbereichs des Halbleiter-Wafers bilden. Das Konzentrationsprofil von Kohlenstoff und Bor in der Tiefenrichtung des Siliciumwafers ist schärfer als im Vergleich mit dem Fall der Monomer-Ionen, allerdings in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung und der Cluster-Größe der Cluster-Ionen. Der Bereich, in dem Kohlenstoff und Bor lokalisiert sind (das heißt, die Modifizierungsschicht) ist ein Bereich mit einer Dicke von etwa 500 nm oder weniger (zum Beispiel etwa 50 nm bis 400 nm). Man beachte, dass die für die Bestrahlung in Form von Cluster-Ionen verwendeten Elemente zu einem gewissen Grad im Verlauf der Bildung der Silicium-Epitaxieschicht 20 thermisch diffundiert

werden. Demgemäß sind nach der Bildung der Silicium-Epitaxieschicht 20 in dem Konzentrationsprofil von Kohlenstoff und Bor, breite Diffusionsbereiche auf beiden Seiten der Spitzen, die die Lokalisierung von diesen Elementen indizieren, gebildet. Allerdings ändert sich die Dicke der Modifizierungsschicht nicht wesentlich (siehe **Fig. 5 (A)** wie unten beschrieben). Folglich, werden Kohlenstoff und Bor in einer hohen Konzentration in einem örtlich begrenzten Bereich abgeschieden. Da die Modifizierungsschicht 18 ist in der Nähe der Oberfläche des Siliciumwafers gebildet ist, kann ferner Annäherungs-Getterung durchgeführt werden. Es wird davon ausgegangen, dass dies zum Erreichen einer höheren Getterfähigkeit führt als in dem Fall des Implantierens von Monomer-Ionen. Man beachte, dass die Bestrahlung gleichzeitig durchgeführt werden kann mit einer Vielzahl von Arten von Ionen in der Form von Cluster-Ionen in einem einzigen Ionen-Bestrahlungsschritt, was auch vorteilhaft ist.

**[0037]** Monomer-Ionen werden typischerweise bei einer Beschleunigungsspannung von etwa 150 keV bis 2000 keV implantiert. Da die Ionen jedoch mit Siliciumatomen mit der Energie kollidieren, was zu einer signifikant verringerten Kristallinität des Oberflächenbereichs des Siliciumwafers führt, dem die Monomer-Ionen implantiert werden. Dementsprechend wird, selbst wenn eine Wärmebehandlung zur Wiederherstellung der verschlechterten Kristallinität nach der Ionenimplantation (Wiederherstellungswärmebehandlung), der Trübungswert des Oberflächenbereichs des später zu bildenden Halbleiter-Wafers in geringem Maß wiederhergestellt.

**[0038]** Im allgemeinen wird Bestrahlung mit Cluster-Ionen bei einer Beschleunigungsspannung von etwa 10 keV / Cluster bis 100 keV / Cluster ausgeführt. Da ein Cluster ein Aggregat aus einer Vielzahl von Atomen oder Molekülen ist, können die Ionen bei reduzierter Energie pro einem Atom oder einem Molekül implantiert werden. Dies führt zu weniger Beschädigung des Kristalls des Oberflächenbereichs des Halbleiter-Wafers. Ferner verschlechtert Cluster-Ionenbestrahlung nicht die Kristallinität des Oberflächenbereichs des Halbleiter-Wafers im Vergleich mit der Monomer-Ionenimplantation auch aufgrund des in **Fig. 3** gezeigten Implantationsmechanismus. Jedoch kann die Kristallinität der äußersten Oberfläche des Halbleiter-Wafers in Abhängigkeit von der Größe oder der Dosis der verwendeten Cluster-Ionen verschlechtert werden, was den Trübungswert der Epitaxieschichtoberfläche erhöhen würde. Selbst in diesem Fall kann der Trübungswert des Oberflächenbereichs der Silicium-Epitaxieschicht 20 ausreichend reduziert werden durch Durchführen einer Wiederherstellungswärmebehandlung unter bestimmten Bedingungen in dem zweiten Schritt nach dem ersten Schritt und anschließendes Durchführen des dritten Schritts des epitaxialen Aufwachsens der Silicium-Epitaxieschicht 20.

**[0039]** Die Cluster-Ionen 16 können eine Vielzahl von Clustern beinhalten in Abhängigkeit von dem Bindungsmodus, und können erzeugt werden beispielsweise durch die in den folgenden Dokumenten beschriebenen bekannten Verfahren. Verfahren zur Erzeugung von Gasclusterstrahlen werden beschrieben in JP H09- 41 138 A und JP H04- 354 865 A Verfahren zur Erzeugung von Ionenstrahlen werden beschrieben in ISHIKAWA, Zyuzo: Science and technology of charged particle beams. Tokyo : Corona Publ., 2001, ISBN 4-339-00734-X THE INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS OF JAPAN: Electron/ion beam engineering. Tokyo : Ohmsha, 1995, ISBN 4-88686-217-9 und YAMADA, Isao: Kurasutā ion bīmu kiso to ōyō: jisedai nano kakō purosesu gjutsu. Tokyo : Nikkan Kōgyō Shinbunsha, 2006, ISBN 4-526-05765-7 Im allgemeinen wird eine Nielsen-Ionenquelle oder eine Kaufman-Ionenquelle zur Erzeugung positiv geladener Cluster-Ionen verwendet, während eine Gegenionenquelle mit hohem Strom unter Verwendung von Serienfertigung zum Erzeugen negativ geladener Cluster-Ionen verwendet wird.

**[0040]** Die Bedingungen für die Bestrahlung mit Cluster-Ionen werden nachfolgend beschrieben. Erstens umfassen Beispiele des zur Bestrahlung verwendet Elements, sind aber nicht beschränkt auf, Kohlenstoff, Bor, Phosphor und Arsen. Im Hinblick auf das Erreichen höherer Getterfähigkeit enthalten die Cluster-Ionen jedoch bevorzugt Kohlenstoff als konstituierendes Element. Kohlenstoffatome an einer Gitterstelle haben einen kleineren Radius als kovalente Silicium-Einkristalle, so dass eine Druckstelle in dem Siliciumkristallgitter erzeugt wird, was zu hoher Getterfähigkeit zum Anziehen von Verunreinigungen im Gitter führt.

**[0041]** Weiterhin enthalten die Cluster-Ionen mehr bevorzugt mindestens zwei Arten von Elementen einschließlich Kohlenstoff als konstituierende Elemente. Da die Arten der effizient zu getternden Metalle abhängig sind von den Arten der abgeschiedenen Elemente, können feste Lösungen aus zwei oder mehr Arten von Elementen eine größere Vielfalt an Metallverunreinigungen abdecken. Beispielsweise kann Kohlenstoff effizient Nickel gettern, während Bor effizient Kupfer und Eisen gettern kann.

**[0042]** Die zu ionisierenden Verbindungen sind nicht besonders beschränkt. Ethan, Methan, Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und dergleichen können als ionisierbare Kohlenstoffquellen-Verbindungen verwendet werden, wäh-

rend Diboran, Decaboran ( $B_{10}H_{14}$ ) und dergleichen als ionisierbare Borquellen-Verbindungen verwendet werden können. Wenn beispielsweise ein Mischgas aus Benzyl und Decaboran als Materialgas verwendet wird, kann ein Wasserstoffverbundungs-Cluster, in dem Kohlenstoff, Bor und Wasserstoff aggregiert sind, hergestellt werden. Alternativ können, wenn Cyclohexan ( $C_6H_{12}$ ) als Material verwendet wird, Cluster-Ionen aus Kohlenstoff und Wasserstoff erzeugt werden. Insbesondere aus Pyren ( $C_{16}H_{10}$ ), Dibenzyl ( $C_{14}H_{14}$ ) oder dergleichen hergestellte  $C_nH_m$ -Cluster ( $3 \leq n \leq 16$ ,  $3 \leq m \leq 10$ ) werden bevorzugt verwendet. Dies liegt daran, dass Cluster-Ionenstrahlen mit einer kleinen Größe einfach gebildet werden können.

**[0043]** Ferner werden die Beschleunigungsspannung und die Clustergröße der Cluster-Ionen gesteuert, wodurch die Spitzenposition des Konzentrationsprofils der konstituierenden Elemente in der Tiefenrichtung der Modifizierungsschicht 18 gesteuert wird. „Cluster-Größe“ bedeutet hierin die Anzahl der Atome oder Moleküle die einen Cluster konstituieren.

**[0044]** In dem ersten Schritt dieser Ausführungsform wird hinsichtlich der Erzielung einer hohen Getterfähigkeit, die Bestrahlung mit den Cluster-Ionen 16 so ausgeführt, dass die Spitze des Konzentrationsprofils der konstituierenden Elemente in der Tiefenrichtung der Modifizierungsschicht 18 in einer Tiefe innerhalb von 150 nm von der Oberfläche des Halbleiter-Wafers 10 liegt. Man beachte, dass „das Konzentrationsprofil der konstituierenden Elemente in der Tiefenrichtung“ in dieser Beschreibung in dem Fall, in dem die konstituierenden Elemente mindestens zwei Arten von Elementen umfassen, die Profile bedeutet in Bezug auf die entsprechenden Einzelelemente, aber nicht in Bezug auf die Summe davon.

**[0045]** Für eine Bedingung, die erforderlich ist, um die Spitzenpositionen auf die Tiefenebene festzulegen, wird, wenn  $C_nH_m$  ( $3 \leq n \leq 16$ ,  $3 \leq m \leq 10$ ) als Cluster-Ionen 16 verwendet wird, die Beschleunigungsspannung je ein Kohlenstoffatom eingestellt auf höher als 0 keV / Atom und 50 keV / Atom oder weniger, und bevorzugt eingestellt auf 40 keV / Atom oder weniger. Ferner ist die Clustergröße 2 bis 100, bevorzugt 60 oder weniger, mehr bevorzugt 50 oder weniger.

**[0046]** Zur Einstellung der Beschleunigungsspannung werden häufig die zwei Verfahren (1) Elektrostatische-Feld-Beschleunigung und (2) Oszillierende-Feld-Beschleunigung verwendet. Beispiele für das erstere Verfahren umfassen ein Verfahren, bei dem eine Vielzahl von Elektroden in regelmäßigen Abständen angeordnet sind und die gleiche Spannung dazwischen angelegt wird, wodurch konstante Beschleunigungsfelder in der Richtung der Achsen gebildet werden. Beispiele für das letztere Verfahren umfassen ein Verfahren der linearen Beschleunigung (Linac), bei dem Ionen in einer geraden Linie überführt und mit Hochfrequenzwellen beschleunigt werden. Die Clustergröße kann eingestellt werden durch Steuern des Drucks des aus einer Düse ausgestoßenen Gases, des Drucks eines Vakuumbehälters, der an den Heizdraht angelegten Spannung in der Ionisierung und dergleichen. Die Clustergröße wird bestimmt durch Auffinden der Clusterzahl-Verteilung durch Massenspektrometrie unter Verwendung des oszillierenden Quadrupolfelds oder der Time-of-Flight-Massenspektrometrie, und die Bildung des Mittelwerts der Clusterzahlen.

**[0047]** Die Dosierung der Cluster-Ionen kann durch die Steuerung der Ionenbestrahlungszeit eingestellt werden. Bei dieser Ausführungsform, ist, um die Getter-Funktion zu erzielen, die Dosis der Cluster-Ionen aus Kohlenstoff bevorzugt  $1 \times 10^{13}$  Atome / cm<sup>2</sup> bis  $1 \times 10^{16}$  Atome / cm<sup>2</sup>. In einem Fall einer Kohlenstoff-Dosis von weniger als  $1 \times 10^{13}$  Atome / cm<sup>2</sup> würde eine ausreichende Getterfähigkeit nicht erreicht werden, wohingegen eine Dosis von mehr als  $1 \times 10^{16}$  Atome / cm<sup>2</sup> große Schäden an der epitaxialen Oberfläche verursachen würde. Insbesondere ist die Dosis der Cluster-Ionen aus Kohlenstoff bevorzugt  $2,0 \times 10^{14}$  Atome / cm<sup>2</sup> oder mehr. In diesem Fall wird der Kristall des Halbleiter-Wafers in einem großen Ausmaß beschädigt, so dass die Wiederherstellung der Kristallinität aufgrund der Wiederherstellungswärmebehandlung von großem Vorteil ist.

**[0048]** Ein weiterer charakteristischer Schritt der vorliegenden Erfindung ist der zweite des Durchführens einer Wärmebehandlung zur Wiederherstellung der Kristallinität (Wiederherstellungswärmebehandlung) an dem Halbleiter-Wafer 10, so dass der Trübungswert des Halbleiter-Waferoberflächenbereichs 10A 0,20 ppm oder weniger ist (**Fig. 1 (C)** und **Fig. 2 (D)**). Wenn der Trübungswert des Halbleiter-Waferoberflächenbereichs 10A 0,20 ppm oder weniger ist und die Silicium-Epitaxieschicht 20 in dem nachfolgenden dritten Schritt gebildet wird, kann der Trübungswert des Epitaxieschicht-Oberflächenbereichs des Halbleiter-Epitaxiewafers 0,30 ppm oder weniger betragen.

**[0049]** Hier ist der Trübungswert ein Indikator für die Oberflächenrauhigkeit des Halbleiter-Wafers. Wenn eine Epitaxieschicht auf dem Halbleiter-Wafer gebildet wird, wird leicht eine als Trübung bezeichnete Abstumpfung auf der Oberfläche der Epitaxieschicht verursacht, so dass es schwierig ist, Lichtpunktdefekte

(LPDs) unter Verwendung eines Partikelzählers zu zählen und die Qualität des Halbleiter-Epitaxiewafer nicht gesichert wäre. Entsprechend wird der Indikator verwendet. Der Trübungswert wird erhalten durch Bestrahlung der Waferoberfläche mit Licht (im wesentlichen, Laserlicht) und das Messen des von der Oberfläche gestreuten Lichts, als Verhältnis des gesamten Streulichts in Bezug auf das einfallende Licht. Diese Messung kann durch einen gegebenen Technik durchgeführt werden. Beispielsweise wird die Waferoberfläche beobachtet mit SP-1, einer Oberflächendefekt-Inspektionsvorrichtung von KLA-Tencor Corporation, im „DWN“-Modus (Darkfield Wide Normal-Modus: Dunkelfeld mit breitem Kanal im senkrecht einfallenden Modus), und der Mittelwert des erhaltenen Trübungswerts kann als Trübungswert bewertet werden. Im Allgemeinen gilt: je höher die Oberflächenrauhigkeit, desto höher der Trübungswert.

**[0050]** Bei einer Ausführungsform wird eine Wiederherstellungswärmebehandlung zur Erzielung eines Trübungswert der Halbleiter-Waferoberfläche 10A von 0,20 ppm oder weniger durchgeführt als Wasserstoff-Backen, das wie in Anspruch 1 (Alternative (i)) angegeben durchgeführt wird vor dem epitaxialen Wachstum in einer epitaxialen Vorrichtung zur Bildung der epitaxialen Halbleiterschicht 20, wodurch die Kristallinität des Siliciumwafers 10 wiederhergestellt wird. Dabei weist die epitaxiale Wachstumsvorrichtung für typische Bedingungen für das Wasserstoff-Backen eine Wasserstoffatmosphäre im Inneren auf; und der Siliciumwafer 10 wird in den Ofen mit einer Ofentemperatur von 600 °C oder mehr und 900 oder weniger °C platziert und erhitzt auf einen Temperaturbereich von 1100 °C oder mehr bis 1200 °C oder weniger bei einer Heizrate von 1 °C / s oder höher bis 15 °C / s oder weniger, und die Temperatur wird für 30 s oder mehr und 1 min oder weniger gehalten. In dieser Ausführungsform wird im Hinblick auf hinreichende Wiederherstellung der Kristallinität eine intensivere Wärmebehandlung als das typische Wasserstoff-Backen aus geführt. Unter den Bedingungen der Wiederherstellungswärmebehandlung umfassend Wasserstoff-Backen kann die Haltetemperatur 1100 °C bis 1200 °C sein und die Haltezeit kann 1 Minute oder mehr sein, und die Haltezeit beträgt bevorzugt 2 Minuten oder mehr. Die obere Grenze der Wärmebehandlungszeit ist nicht besonders beschränkt; beispielsweise kann sie 10 Minuten betragen. Selbst wenn die Wärmebehandlung für mehr als 10 Minuten durchgeführt wird, wird der Effekt der Wiederherstellung der durch die Cluster-Ionenbestrahlung abgebauten Kristallinität gesättigt und eine längere Wärmebehandlungszeit führt zu verminderter Produktivität. Man beachte, dass in dem Fall, in dem die Wiederherstellungswärmebehandlung auch als Wasserstoff-Backen vor dem Epitaxiewachstum ausgeführt wird, wenn die gemäß Wasserstoff-Backen modellierte Wiederherstellungswärmebehandlung unter den gleichen Bedingungen wie Wasserstoff-Backen durchgeführt wird, der Trübungswert des Oberflächenbereichs 10A des Halbleiter-Wafer nach der Wiederherstellungswärmebehandlung und vor der Bildung der Epitaxieschicht gemessen werden kann.

**[0051]** Bei einer weiteren Ausführungsform der Wiederherstellungswärmebehandlung wird im zweiten Schritt durchgeführt: eine Wärmebehandlung mit einer schnellen Erwärmungsvorrichtung, die getrennt ist von der epitaxialen Vorrichtung, wie einer Chargen-Wärmebehandlungsvorrichtung (vertikale Wärmebehandlungsvorrichtung oder horizontale Wärmebehandlungsvorrichtung) wie in Anspruch 1 (Alternative (ii)) angegeben. Die Wiederherstellungswärmebehandlung wird in diesem Fall bei Wiederherstellungswärmebehandlungsbedingungen von 900 °C bis 1200 °C und 10 s bis 1 h durchgeführt. Hierbei ist die Backtemperatur 900 °C oder mehr und 1200 °C oder weniger, denn wenn sie weniger als 900 °C ist, kann die Wirkung der Wiederherstellung der Kristallinität kaum erreicht werden, während, wenn sie mehr als 1200 °C ist, würden Versetzungen gebildet aufgrund der Wärmebehandlung bei einer hohen Temperatur und die Wärmelast an der Vorrichtung würde erhöht werden. Ferner ist die Wärmebehandlungszeit 10 s oder mehr und 1 h oder weniger, da wenn sie weniger als 10 s ist, kann die Wiederherstellungs-Wirkung kaum erreicht werden, während, wenn sie mehr als 1 h ist, die Produktivität abnähme, und die Wärmelast an der Vorrichtung erhöht werden würde. In diesem Fall wird nach der Durchführung der obigen Wiederherstellungswärmebehandlung der Halbleiter-Wafer 10 in eine epitaxiale Wachstumsvorrichtung überführt und der nachfolgende dritte Schritt durchgeführt. Man beachte, dass, wenn die Dosis der Cluster-Ionen aus Kohlenstoff  $1,0 \times 10^{15}$  Atome / cm<sup>2</sup> oder mehr beträgt, sich die für die Wiederherstellungswärmebehandlung erforderliche Zeit erhöht; somit wird die Wiederherstellungswärmebehandlung bevorzugt vor der Überführung zu der epitaxialen Wachstumsvorrichtung durchgeführt.

**[0052]** In dem dritten Schritt dieser Ausführungsform ist die zweite auf der Modifizierungsschicht 18 gebildete Silicium-Epitaxieschicht 20 eine epitaxiale Siliciumschicht, die durch chemische Dampfabscheidung (CVD) gebildet wird, und sie kann unter typischen Bedingungen gebildet werden. Zum Beispiel ein Ausgangsgas wie Dichlorsilan oder Trichlorsilan kann in eine Kammer unter Verwendung von Wasserstoff als ein Trägergas eingeführt werden, so dass das Quellenmaterial epitaxial auf dem Halbleiter-Wafer 10 durch CVD bei einer Temperatur im Bereich von etwa 1000 °C bis 1200 °C aufgewachsen wird, obgleich die Wachstumstemperatur auch von der zu verwendenden Gasquelle abhängt. Die Silicium-Epitaxieschicht 20 hat bevorzugt eine Dicke im Bereich von 1 µm bis 15 µm. Wenn die Dicke weniger als 1 µm ist, würde sich der spezifische

Widerstand der zweiten Silicium-Epitaxieschicht 20 durch Ausdiffundieren von Dotierstoffen aus dem Halbleiter-Wafer 10 ändern, während eine Dicke von mehr als 15 µm die spektralen Empfindlichkeitseigenschaften der Festkörper-Bildsensorvorrichtung beeinflussen würde. Die zweite Silicium-Epitaxieschicht 20 wird als Vorrichtungsschicht zur Herstellung einer von hinten beleuchteten Festkörper-Bildsensorvorrichtung verwendet.

**[0053]** Die in **Fig. 2** gezeigte zweiten Ausführungsform hat auch das Merkmal, dass nicht der Volumen-Halbleiter-Wafer 12, aber die erste Epitaxieschicht 14 mit Cluster-Ionen bestrahlt wird. Der Volumen-Halbleiter-Wafer hat eine Sauerstoffkonzentration, die um zwei Größenordnungen höher ist als die der Epitaxieschicht. Dementsprechend wird eine größere Menge an Sauerstoff diffundiert in die Modifizierungsschicht, die in dem Volumen-Halbleiter-Wafer ausgebildet ist, als in die Modifizierungsschicht, die in der Epitaxieschicht gebildet ist, und erstere Modifizierungsschicht fängt eine große Menge an Sauerstoff ein. Der eingeschlossene Sauerstoff wird in einem Vorrichtungsherstellungsverfahren von der Einfangstelle freigegeben und in einen aktiven Bereich der Vorrichtung diffundiert, um Punktdefekte zu bilden. Dies beeinflusst die elektrischen Eigenschaften der Vorrichtung. Daher ist es eine wichtige Designbedingung im Vorrichtungsherstellungsverfahren eine Epitaxieschicht mit einer niedrigen gelösten Sauerstoffkonzentration mit Cluster-Ionen zu bestrahlen und eine Getter-Schicht in der Epitaxieschicht zu bilden, in der die Wirkung der Sauerstoffdiffusion nahezu vernachlässigbar ist.

#### Halbleiter-Epitaxiewafer

**[0054]** Als nächstes werden die Halbleiter-Epitaxiewafer 100 und 200 beschrieben, die nach den obigen Herstellungsverfahren hergestellt werden. Ein Halbleiter-Epitaxiewafer 100 gemäß der ersten Ausführungsform und einer Halbleiter-Epitaxiewafer 200 gemäß der zweiten Ausführungsform weisen jeweils auf: einen Halbleiter-Wafer 10; eine Modifizierungsschicht 18 aus einem bestimmten Element, enthalten als feste Lösung in dem Halbleiter-Wafer 10 in einem Oberflächenbereich des Halbleiter-Wafers 10; und eine Silicium-Epitaxieschicht 20 auf dieser Modifizierungsschicht 18, wie in **Fig. 1 (D)** und **Fig. 2 (E)** gezeigt. Merkmale von beiden sind: das Konzentrationsprofil des bestimmten Elements in der Tiefenrichtung der Modifizierungsschicht 18 hat eine Halbwertsbreite W von 100 nm oder weniger und der Trübungswert des Oberflächenbereichs der Silicium-Epitaxieschicht 20 beträgt 0,30 ppm oder weniger.

**[0055]** In entsprechender Weise können, gemäß dem Herstellungsverfahren der vorliegenden Erfindung, die Elemente, die Cluster-Ionen konstituieren, in einer hohen Konzentration in einem lokalisierten Bereich abgeschieden werden, verglichen mit Monomer-Ionenimplantation, die zu der Halbbreite von 100 nm oder weniger führt. Die untere Grenze davon kann auf 10 nm eingestellt werden. Man beachte, dass das „Konzentrationsprofil in der Tiefenrichtung“ hier eine Konzentrationsverteilung in der Tiefenrichtung bedeutet, die durch Sekundärionen-Massenspektrometrie (SIMS) gemessen wird. Ferner bedeutet „die Halbwertsbreite des Konzentrationsprofils eines bestimmten Elements“ die Halbwertsbreite des Konzentrationsprofils des bestimmten Elements, gemessen durch SIMS, wobei die Epitaxieschicht auf 1 µm verdünnt ist unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit, wenn die Dicke der Epitaxieschicht 1 µm übersteigt.

**[0056]** Ferner wird gemäß dem Herstellungsverfahren der vorliegenden Erfindung die Silicium-Epitaxieschicht 20 nach dem Durchführen der Wiederherstellungswärmebehandlung nach der Cluster-Ionenbestrahlung gebildet, so dass der Trübungswert des Oberflächenbereichs 10A des Halbleiter-Wafers 10 0,20 ppm oder weniger ist, was ermöglicht, dass der Trübungswerts 0,30 ppm oder weniger beträgt. Man beachte, dass die Messung des Trübungswerts des Halbleiter-Epitaxiewafer-Oberflächenbereichs in der gleichen Weise wie bei der oben beschriebenen Messung des Trübungswerts des Halbleiter-Wafers durchgeführt werden kann.

**[0057]** Das bestimmte Element ist nicht besonders beschränkt, solange es ein anderes Element ist als das Hauptmaterial des Halbleiter-Wafers (Silicium, wenn der Halbleiter-Wafer ein Siliciumwafer ist). Jedoch sind Kohlenstoff oder mindestens zwei Arten von Elementen einschließlich Kohlenstoff bevorzugt, wie oben beschrieben.

**[0058]** Im Hinblick auf das Erreichen höherer Getterfähigkeit für die beiden Halbleiter-Epitaxiewafer 100 und 200, liegt die Spitze des Konzentrationsprofils in der Modifizierungsschicht 18 in einer Tiefe innerhalb von 150 nm von der Oberfläche des Halbleiter-Wafers 10. Des weiteren ist die Spitzenkonzentration des Konzentrationsprofils bevorzugt  $1 \times 10^{15}$  Atome / cm<sup>3</sup> oder mehr, stärker bevorzugt im Bereich von  $1 \times 10^{17}$  Atome / cm<sup>3</sup> bis  $1 \times 10^{22}$  Atome / cm<sup>3</sup>, noch mehr bevorzugt im Bereich von  $1 \times 10^{19}$  Atome / cm<sup>3</sup> bis  $1 \times 10^{21}$  Atome / cm<sup>3</sup>.

**[0059]** Für die beiden Halbleiter-Epitaxiewafer 100 und 200 ist der Trübungswert des Oberflächenbereichs der Silicium-Epitaxieschicht 20 bevorzugt 0,30 ppm oder weniger, stärker bevorzugt 0,26 ppm oder weniger und die Untergrenze kann auf 0,05 ppm eingestellt werden.

**[0060]** Die Dicke der Modifizierungsschicht 18 in der Tiefenrichtung kann ungefähr in dem Bereich von 30 nm bis 400 nm liegen.

**[0061]** Gemäß den Halbleiter-Epitaxiewafern 100 und 200 dieser Ausführungsform kann eine höhere Getterfähigkeit als herkömmlich erreicht werden, was es ermöglicht, Metallkontamination weiter zu unterdrücken und dass der Trübungswert des Oberflächenbereichs der Epitaxieschicht 0,30 ppm oder weniger sein kann.

#### Verfahren zur Herstellung von Festkörper-Bildsensorvorrichtungen

**[0062]** Bei einem Verfahren zur Herstellung einer Festkörper-Bildsensorvorrichtung gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung kann eine Festkörper-Bildsensorvorrichtung gebildet werden auf einem nach den obigen Herstellungsverfahren hergestellten Epitaxie-Wafer oder einem obigen Epitaxie-Wafer, und zwar auf der Silicium-Epitaxieschicht 20, die sich auf der Oberfläche der Halbleiter-Epitaxiewafer 100 und 200 befindet. Für die durch diese Herstellungsverfahren erhaltenen Festkörper-Bildsensorvorrichtungen, können die Wirkungen der während der Schritte im Herstellungsprozess verursachten Metallkontamination verminderst werden als herkömmlich und Weißpunktdefekte ausreichend unterdrückt werden als herkömmlich.

**[0063]** Typische Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung sind oben beschrieben worden; jedoch ist die vorliegende Erfindung nicht auf diese Ausführungsformen beschränkt. Zum Beispiel können zwei Schichten von Epitaxieschichten auf dem Halbleiter-Wafer 10 gebildet werden.

#### BEISPIELE

##### Referenzversuchsbeispiele

**[0064]** Zuerst wurden, um den Unterschied zwischen der Cluster-Ionenbestrahlung und der Monomer-Ionenimplantation zu klären, Versuche wie folgt durchgeführt.

##### Referenzbeispiel 1

**[0065]** Ein n-Typ-Siliciumwafer (Durchmesser: 300 mm, Dicke: 725 µm, Dotierstoff: Phosphor, Dotierstoffkonzentration:  $4 \times 10^{14}$  Atome / cm<sup>3</sup>), erhalten aus einem CZ-Einkristall, wurde hergestellt. Als nächstes wurden C<sub>5</sub>H<sub>5</sub>-Clustern aus Dibenzyl (C<sub>14</sub>H<sub>14</sub>) erzeugt unter Verwendung eines Cluster-Ionengenerators (CLARIS von Nissin Ion Equipment Co., Ltd.) und ein Siliciumwafer wurde mit den Clustern unter folgenden Bestrahlungsbedingungen bestrahlt: Dosis:  $1,2 \times 10^{14}$  Cluster / cm<sup>2</sup> (Kohlenstoff-Dosis:  $6,0 \times 10^{14}$  Atome / cm<sup>2</sup>), und Beschleunigungsspannung je ein Kohlenstoffatom: 14,8 keV / Atom.

##### Referenzbeispiel 2

**[0066]** Der gleiche Siliciumwafer wie in Referenzbeispiel 1 wurde mit Monomer-Ionen aus Kohlenstoff, die unter Verwendung von CO<sub>2</sub> als Materialgas erzeugt wurden, implantiert, statt der Bestrahlung mit Cluster-Ionen unterworfen zu werden, und zwar unter den gleichen Bestrahlungsbedingungen wie in Referenzbeispiel 1, außer dass die Dosis  $1,2 \times 10^{14}$  Atome / cm<sup>2</sup> war und die Beschleunigungsspannung 300 keV / Atom war.

#### SIMS-Ergebnisse

**[0067]** Die in den Referenzbeispielen 1 und 2 hergestellten Proben wurden einer SIMS-Analyse unterzogen, um das in **Fig. 4** gezeigte Konzentrationsprofil zu erhalten. Man beachte, dass die horizontale Achse der Tiefe von der Oberfläche des Siliciumwafers entspricht. Wie aus **Fig. 4** klar wird, ist in Referenzbeispiel 1, bei dem Cluster-Ionenbestrahlung durchgeführt wurde, das Kohlenstoffkonzentrationsprofil scharf; auf der anderen Seite ist in Referenzbeispiel 2, bei dem Monomer-Ionenimplantation durchgeführt wurde, das Kohlenstoffkonzentrationsprofil breit. Ferner ist in Referenzbeispiel 1, verglichen mit Vergleichsbeispiel 2, die Spitzenkonzentration des Konzentrationsprofils von Kohlenstoff höher und die Spitzenwert-Position näher an

der Oberfläche des Siliciumwafer. Daher dürfte das Konzentrationsprofil von Kohlenstoff nach der Bildung der Epitaxieschicht die gleiche Tendenz haben.

#### Beispiel 1

**[0068]** Ein n-Typ-Siliciumwafer (Durchmesser: 300 mm, Dicke: 725 µm, Dotierstoff: Phosphor, Dotierstoffkonzentration:  $4 \times 10^{14}$  Atome / cm<sup>3</sup>), erhalten aus einem CZ-Einkristall, wurde hergestellt. Als nächstes wurden C<sub>5</sub>H<sub>5</sub>-Clustern aus Dibenzyl (C<sub>14</sub>H<sub>14</sub>) erzeugt unter Verwendung eines Cluster-Ionengenerators (CLARIS von Nissin Ion Equipment Co., Ltd.) und ein Siliciumwafer wurde mit den Clustern bestrahlt unter den folgenden Bestrahlungsbedingungen: Dosis:  $1,2 \times 10^{14}$  Cluster / cm<sup>2</sup> (Kohlenstoff-Dosis:  $6,0 \times 10^{14}$  Atome / cm<sup>2</sup>), Beschleunigungsspannung je ein Kohlenstoffatom: 14,8 keV / Atom. Anschließend wurde der Siliciumwafer in eine epitaxiale Wachstumsvorrichtung (hergestellt von Applied Materials, Inc.) überführt und in der Vorrichtung für 2 min bei 1130 °C einer Wärmebehandlung unterworfen, die sowohl die Wiederherstellungswärmebehandlung zur Wiederherstellung der durch die Cluster-Ionenbestrahlung verschlechterten Kristallinität als auch Wasserstoff-Backen beinhaltet. Danach wurde eine epitaxiale Siliciumschicht (Dicke: 7 µm, Dotierstoff: Phosphor, Dotierstoffkonzentration:  $1 \times 10^{15}$  Atome / cm<sup>3</sup>) epitaxial auf dem Siliciumwafer durch CVD bei 1000 °C bis 1150 °C unter Verwendung von Wasserstoff als Trägergas und Trichlorsilan als Ausgangsgas aufgewachsen, wodurch ein epitaxialer Siliciumwafer der vorliegenden Erfindung hergestellt wurde.

#### Beispiel 2

**[0069]** Ein epitaxialer Siliciumwafer gemäß der vorliegenden Erfindung wurde hergestellt unter den gleichen Bedingungen wie in Beispiel 1, mit Ausnahme der folgenden Bedingungen. Ein Siliciumwafer wurde einer Wiederherstellungswärmebehandlung unterworfen unter den Bedingungen von 900 °C für 10 s unter Verwendung einer RTA-Vorrichtung (hergestellt von Mattson Thermal Products GmbH), bevor er zu einer epitaxialen Wachstumsvorrichtung überführt wurde anstelle der Wiederherstellungswärmebehandlung umfassend Wasserstoff-Backen in der epitaxialen Vorrichtung. Danach wurde der Siliciumwafer zu der epitaxialen Wachstumsvorrichtung überführt und in der Vorrichtung für 30 s dem Wasserstoff-Backen unterworfen unter den Bedingungen einer Temperatur von 1130 °C, wodurch eine Epitaxieschicht aufgewachsen wurde.

#### Beispiel 3

**[0070]** Ein epitaxialer Siliciumwafer gemäß der vorliegenden Erfindung wurde in der gleichen Weise wie in Beispiel 1 hergestellt, außer dass die Cluster-Ionenbestrahlungsbedingungen zu den in Tabelle 1 angegebenen Bedingungen geändert wurden.

#### Beispiel 4

**[0071]** Ein epitaxialer Siliciumwafer gemäß der vorliegenden Erfindung wurde in der gleichen Weise wie in Beispiel 2 hergestellt, außer dass die Cluster-Ionenbestrahlungsbedingungen zu den in Tabelle 1 angegebenen Bedingungen geändert wurden.

#### Vergleichsbeispiele 1 und 2

**[0072]** Epitaxiale Siliciumwafer gemäß den Vergleichsbeispielen 1 und 2 wurden in der gleichen Weise wie in Beispiel 2 hergestellt, mit der Ausnahme, dass die Cluster-Ionenbestrahlungsbedingungen zu den in Tabelle 1 angegebenen Bedingungen geändert wurden und die Wiederherstellungswärmebehandlung nicht durchgeführt wurde.

#### Vergleichsbeispiele 3 und 4

**[0073]** Epitaxiale Siliciumwafer gemäß den Vergleichsbeispielen 3 und 4 wurden in der gleichen Weise wie in Vergleichsbeispiel 1 hergestellt, außer dass Monomer-Ionen aus Kohlenstoff unter den in Tabelle 1 angegebenen Bedingungen implantiert wurden, statt mit Cluster-Ionen zu bestrahlen, und die Wiederherstellungswärmebehandlung unter den in Tabelle 1 angegebenen Bedingungen durchgeführt wurde.

#### Bewertungsverfahren und Bewertungsergebnis

**[0074]** Die in den obigen Beispielen und den Vergleichsbeispielen hergestellten Proben wurden bewertet. Die Bewertungsverfahren sind nachstehend angegeben.

## (1) SIMS-Analyse

**[0075]** Die epitaxialen Siliciumwafer von Beispiel 1 und Vergleichsbeispiel 4 wurden jeweils als typische Beispiele analysiert durch SIMS, um das in den **Fig. 5 (A)** und **Fig. 5 (B)** gezeigte Konzentrationsprofil von Kohlenstoff zu erhalten. Man beachte, dass die horizontale Achse der Tiefe von der Oberfläche der Epitaxieschicht entspricht. Ferner wurde jede in den Beispielen 1 bis 4 und Vergleichsbeispielen 1 bis 4 hergestellte Probe nach dem Verdünnen der Epitaxieschicht auf 1 µm der SIMS unterworfen. Die so erhaltene Halbwertsbreite, Spitzenkonzentration und Spitzenposition (Spitzentiefe von der Oberfläche nachdem die Epitaxieschicht entfernt worden ist) des Konzentrationsprofils von Kohlenstoff sind in Tabelle 1 angegeben.

## (2) Bewertung der Getterfähigkeit

**[0076]** Die Oberfläche des epitaxialen Siliciumwafers in jeder der in Beispiel 1 und Vergleichsbeispiel 4 hergestellten Proben wurde absichtlich kontaminiert durch das Schleuderbeschichtungskontaminationsverfahren unter Verwendung eines Ni-Kontaminationsmittels ( $1,0 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ ) und dann für 30 Minuten einer Wärmebehandlung bei 900 °C unterworfen. Danach wurde eine SIMS-Analyse durchgeführt. Das Ni-Konzentrationsprofil von Beispiel 1 und Vergleichsbeispiel 4 wird mit dem Kohlenstoffkonzentrationsprofil davon gezeigt (**Fig. 5 (A)** und **Fig. 5 (B)**). Die Ergebnisse der Bewertung der Getterfähigkeit der anderen Beispiele und Vergleichsbeispiele sind in Tabelle 1 gezeigt. Die Spitzenkonzentration des Ni-Konzentrationsprofils wurde in die folgenden Kategorien als Kriterium klassifiziert.

++:  $1,0 \times 10^{17} \text{ Atome} / \text{cm}^3$  oder mehr

+:  $5,0 \times 10^{16} \text{ Atome} / \text{cm}^3$  oder mehr und weniger als  $1,0 \times 10^{17} \text{ Atome} / \text{cm}^3$

-: weniger als  $5,0 \times 10^{16} \text{ Atome} / \text{cm}^3$

## (3) Bewertung von epitaxialen Defekten

**[0077]** Epitaxiale Defekte, die in der Epitaxieschichtoberfläche jeder in den Beispielen und Vergleichsbeispielen hergestellten Proben beobachtet wurden, wurden bewertet. Die Oberfläche jeder Epitaxieschicht wurde beobachtet unter Verwendung eines SP-2, einer von KLA-Tencor Corporation hergestellten Oberflächendefekt-Inspektionsvorrichtung, und zwar im DWO-Modus („Dark Field Wide Oblique mode“: Dunkelfeld mit breitem Kanal mit Schräg-Einfall-Modus), und die detektierten Defektstellen wurden an einer festen Stelle beobachtet unter Verwendung eines Atomkraftmikroskops (AFM) und beurteilt. Die Anzahl der in der Epitaxieschichtoberfläche beobachteten Stapelfehler (SF), die von „crystal originated particles“ (COPs) herrühren, wurde gezählt, und die Bewertung wurde durchgeführt unter der Annahme, dass die Stapelfehler epitaxiale Defekte sind. Die Bewertungsergebnisse der epitaxialen Defekte sind in der Tabelle 1 gezeigt. Die Bewertungskriterien sind wie folgt.

++: 2 / Wafer oder weniger

+: mehr als 2 / Wafer und 10 / Wafer oder weniger

-: mehr als 10 / Wafer und 50 / Wafer oder weniger

—: mehr als 50 / Wafer

## (4) Bewertung des Trübungswerts

**[0078]** Bei jeder in den Beispielen und Vergleichsbeispielen hergestellten Proben wurden die Siliciumwaferoberfläche vor der Bildung der Epitaxieschicht und die Epitaxieschichtoberfläche nach der Bildung der Epitaxieschicht jeweils mit einem SP-1, einer Oberflächendefekt-Inspektionsvorrichtung, hergestellt von KLA-Tencor Corporation, beobachtet, und zwar im DWN-Modus, und der Mittelwert des erhaltenen Trübungswerts wurde als Trübungswert bewertet. Die Ergebnisse der Bewertung des Trübungswertes sind in Tabelle 1 angegeben. Man beachte, dass für den Trübungswert des Siliciumwafer-Oberflächenbereichs nach der Cluster-Ionenbestrahlung und vor der Bildung der Epitaxieschicht in den Beispielen 1 und 3 der Trübungswert gemessen wurde nach dem Durchführen der gemäß Wasserstoff-Backen modellierten Wiederherstellungswärmebehandlung.

[Tabelle 1]

	Cluster-Bestrahlungs-/Monomer-Implantations-Bedingung		Wiederherstellungswärmbehandlungsbedingung		Bewertung vor Bildung der epitaxialen Schicht				Bewertung des epitaxialen Siliciumwafers					
					Bestrahlungs-/Implantations-Ion	Beschleunigungs-spannung (keV/A-tom)	Dosis* (Cluster/cm <sup>2</sup> ) (Atom-e/cm <sup>2</sup> )	Tem p. (°C)	Zeit	Vorrichungstyp	Trübungswert (ppm)	Halbwertsbreite (nm)	Spitzenposition der Kohlenstoffkonzentration (nm)	Spitzenwert der Kohlenstoffkonzentration (Atom-e/cm <sup>3</sup> )
Beispiel 1	Cluster-Ion	C <sub>5</sub> H <sub>5</sub>	14,8	1,2×10 <sup>14</sup>	1130	2 min	Epitaxie-vorrichung	0,155	91	50	3,00×10 <sup>19</sup>	0,233	++	++
Beispiel 2	Cluster-Ion	C <sub>5</sub> H <sub>5</sub>	14,8	1,2×10 <sup>14</sup>	900	10s	RTA	0,150	93	50	3,02×10 <sup>19</sup>	0,215	++	++
Ver-gleichsbeispiel 1	Cluster-Ion	C <sub>5</sub> H <sub>5</sub>	14,8	1,2×10 <sup>14</sup>	-	-	-	0,322	89	50	3,00×10 <sup>19</sup>	0,350	++	-
Beispiel 3	Cluster-Ion	C <sub>5</sub> H <sub>5</sub>	14,8	3,0×10 <sup>14</sup>	1130	2 min	Epitaxie-vorrichung	0,193	96	80	4,00×10 <sup>19</sup>	0,256	++	++
Beispiel 4	Cluster-Ion	C <sub>5</sub> H <sub>5</sub>	14,8	3,0×10 <sup>14</sup>	900	10s	RTA	0,190	96	80	3,98×10 <sup>19</sup>	0,260	++	++
Ver-gleichsbeispiel 2	Cluster-Ion	C <sub>5</sub> H <sub>5</sub>	14,8	3,0×10 <sup>14</sup>	-	-	-	0,507	95	80	4,01×10 <sup>19</sup>	5,970	++	-
Ver-gleichsbeispiel 3	Mono-mer-Ion	C	300	1,2×10 <sup>14</sup>	-	-	-	0,157	270	700	1,00×10 <sup>19</sup>	0,275	-	-

Cluster-Bestrahlungs-/Monomer-Implantations-Bedingung		Wiederherstellungsbedingung		Bewertung vor Bildung der epitaxialen Schicht		Bewertung des epitaxialen Siliciumwafers								
						Typ	Bestrahlungs- / Implan- tations- Ion	Beschleu- nigungs- spannung (keV/A- tom)	Dosis* (Clus- ter/cm <sup>2</sup> ) (Atom- e/cm <sup>2</sup> )	Tem- p. (°C)	Zeit	Vorrich- tungstyp	Tribungs- wert (ppm)	Spitzenpo- sition der Kohlen- stoffkon- zentration (nm)
Vergleichsbeispiel 4	Monomer-Ion	C	300	1,2×10 <sup>14</sup>	900	10s	RTA	0,140	270	700	1,03×10 <sup>19</sup>	0,270	-	+

\* Die Einheit Cluster/cm<sup>2</sup> wird verwendet im Fall der Cluster-Ionen-Bestrahlung, während die Einheit Atome/cm<sup>2</sup> verwendet wird im Fall der Monomer-Ionen-Implantation

**[0079]** **Fig. 5 (A)** und **Fig. 5 (B)** zeigen, dass eine Modifizierungsschicht aus Kohlenstoff als bei hoher Konzentration lokalisierte feste Lösung, verglichen mit dem Vergleichsbeispiel 4, gebildet wird durch die Cluster-Ionenbestrahlung in Beispiel 1. Vergleicht man Beispiel 1 mit Vergleichsbeispiel 4, zeigen die Ni-Konzentrationsprofile, dass die in Beispiel 1 durch die Cluster-Ionenbestrahlung gebildete Modifizierungsschicht eine große Menge an Ni einfing, wodurch eine hohe Getterfähigkeit erzielt wurde. Wie Tabelle 1 zeigt, ist in jedem der Beispiele 1 bis 4 und Vergleichsbeispiele 1 und 2, bei denen eine Cluster-Ionenbestrahlung durchgeführt wurde, die Halbwertsbreite 100 nm oder weniger, was zu ausreichender Getterfähigkeit führte. Andererseits ist in jedem der Vergleichsbeispiele 3 und 4, bei denen eine Monomer-Ionenimplantation durchgeführt wurde, die Halbwertsbreite mehr als 100 nm, was zu ungenügender Getterfähigkeit führte. Somit wurde, im Vergleich mit den Vergleichsbeispielen 3 und 4, bei denen eine Monomer-Ionenimplantation durchgeführt wurde, in den Beispielen 1 bis 4 und Vergleichsbeispielen 1 und 2, bei denen eine Cluster-Ionenbestrahlung durchgeführt wurde, ein stärkeres Gettern erhalten, da die Halbwertsbreite des Kohlenstoffkonzentrationsprofils kleiner war.

**[0080]** Bezuglich des Trübungswerts wird nun auf Tabelle 1 Bezug genommen. Vergleicht man die Beispiele 1 bis 4, bei denen eine Wiederherstellungswärmebehandlung durchgeführt wurde, mit den Vergleichsbeispielen 1 und 2, bei denen eine Wiederherstellungswärmebehandlung nicht durchgeführt wurde, bei denen jeweils eine Cluster-Ionenbestrahlung durchgeführt wurde, zeigt sich: bei den Beispielen 1 bis 4 war der Trübungswert des Epitaxieschicht-Oberflächenbereichs 0,30 ppm oder weniger aufgrund der Wiederherstellungswärmebehandlung, während ein Trübungswert von 0,30 ppm oder weniger in den Vergleichsbeispielen 1 und 2 ohne Wiederherstellungswärmebehandlung nicht erreicht wurde. So wurde festgestellt, dass, um einen epitaxialen Siliciumwafer mit einem Trübungswert von 0,30 ppm oder weniger in dem Fall der Durchführung einer Cluster-Ionenbestrahlung zu erhalten, die Wiederherstellungswärmebehandlung durchgeführt werden muss, damit der Trübungswert des Siliciumwafer-Oberflächenbereichs vor der Bildung der Epitaxieschicht 0,20 ppm oder weniger ist. Durch Vergleich von Vergleichsbeispiel 3 mit Vergleichsbeispiel 4, wurde des weiteren festgestellt, dass der Trübungswert durch die Wiederherstellungswärmebehandlung auch im Fall der Monomer-Ionenimplantation wiederhergestellt wurde; der Wiederherstellungs-Effekt ist jedoch klein. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass im Fall der Cluster-Ionenbestrahlung die Ebenheit der Siliciumwaferoberfläche verschlechtert wird; während die Kristallinität des Oberflächenbereichs des Siliciumwafers im Fall von Monomer-Ionenimplantation aufgrund der hohen Energie signifikant verschlechtert war.

**[0081]** Man beachte, dass Tabelle 1 auch die Korrelation zwischen dem Trübungswert und den epitaxialen Defekten zeigt. Insbesondere werden, wenn der Trübungswert niedrig ist, bessere Ergebnisse in Bezug auf die epitaxialen Defekte erhalten.

**[0082]** Die obigen Ergebnisse zeigen, dass Cluster-Ionenbestrahlung notwendig ist, um höhere Getterfähigkeit zu erzielen, wie in den Beispielen gezeigt. Ferner wurde festgestellt, dass die Durchführung einer Wiederherstellungswärmebehandlung nach der Cluster-Ionenbestrahlung den Trübungswert des Epitaxieschicht-Oberflächenbereichs auf einen ausreichend niedrigen Wert wie 0,30 ppm oder weniger verringert.

## GEWERBLICHE ANWENDBARKEIT

**[0083]** Gemäß der vorliegenden Erfindung kann ein Halbleiter-Epitaxiewafer erhalten werden, der Metallverunreinigungen unterdrücken kann und bei dem der Trübungswert des Oberflächenbereichs einer Epitaxieschicht reduziert ist durch das Erreichen höherer Getterfähigkeit; und eine Festkörper-Bildsensorvorrichtung hoher Qualität kann aus dem Halbleiter-Epitaxiewafer gebildet werden.

## BEZUGSZEICHENLISTE

- 10 Halbleiter-Wafer
- 10A Oberflächenbereich des Halbleiter-Wafers
- 12 Volumen-Halbleiter-Wafer
- 14 erste Epitaxieschicht
- 16 Cluster-Ionen
- 18 Modifizierungsschicht

- 20 (Zweite) Epitaxieschicht  
 100 Halbleiter-Epitaxiewafer  
 200 Halbleiter-Epitaxiewafer

### Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung eines Halbleiter-Epitaxiewafers (100, 200), umfassend:  
 einen ersten Schritt des Bestrahls eines Halbleiter-Wafers (10, 12) mit Cluster-Ionen (16), wodurch eine Modifizierungsschicht (18) aus einem konstituierenden Element der Cluster-Ionen (16), enthalten als feste Lösung, in einem Oberflächenbereich (10A) des Halbleiter-Wafers (10, 12) gebildet wird;  
 einen zweiten Schritt der Durchführung einer Wärmebehandlung zur Wiederherstellung der Kristallinität an dem Halbleiter-Wafer (10, 12) nach dem ersten Schritt, so dass der Trübungswert des Oberflächenbereichs (10A) des Halbleiter-Wafers (10, 12) 0,20 ppm oder weniger ist, wobei der Trübungswert definiert ist als der Mittelwert des erhaltenen Trübungswerts der Oberfläche des Halbleiter-Wafers (10, 12), gemessen mit der Oberflächendefekt-Inspektionsvorrichtung SP-1 von KLA-Tencor Corporation, im „DWN“-Modus; und  
 einen dritten Schritt des Bildens einer Silicium-Epitaxieschicht (20) auf der Modifizierungsschicht (18) des Halbleiter-Wafers (10, 12) durch chemische Dampfabscheidung (CVD) nach dem zweiten Schritt;  
 wobei der zweite Schritt unter folgenden Bedingungen durchgeführt wird:  
 (i) als Wasserstoff-Backen in einer epitaxialen Vorrichtung zur Bildung einer epitaxialen Halbleiterschicht, wobei die Haltetemperatur 1100 °C bis 1200 °C ist und die Haltezeit 1 Minute oder mehr ist, oder  
 (ii) als Wärmebehandlung mit einer schnellen Erwärmungsvorrichtung, die getrennt ist von der epitaxialen Vorrichtung, wobei die Backtemperatur 900 °C bis 1200 °C ist und die Backzeit 10 s bis 1 h ist.
2. Verfahren zur Herstellung eines Halbleiter-Epitaxiewafers (100, 200) gemäß Anspruch 1, wobei der Halbleiter-Wafer (10, 12) ein Siliciumwafer ist.
3. Verfahren zur Herstellung eines Halbleiter-Epitaxiewafers (200) gemäß Anspruch 1, wobei der Halbleiter-Wafer (10) ein epitaxialer Siliciumwafer ist, in dem eine epitaxiale Siliciumschicht (14) auf einer Oberfläche eines Siliciumwafers (12) gebildet ist, und die Modifizierungsschicht (18) in einem Oberflächenbereich (10A) der epitaxialen Siliciumschicht (14) in dem ersten Schritt gebildet wird.
4. Verfahren zur Herstellung eines Halbleiter-Epitaxiewafers (100, 200) gemäß einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei die Cluster-Ionen (16) Kohlenstoff als konstituierendes Element enthalten.
5. Verfahren zur Herstellung eines Halbleiter-Epitaxiewafers (100, 200) gemäß Anspruch 4, wobei die Cluster-Ionen (16) mindestens zwei Arten von Elementen einschließlich Kohlenstoff als konstituierende Elemente enthalten.
6. Verfahren zur Herstellung eines Halbleiter-Epitaxiewafers (100, 200) gemäß Anspruch 4 oder 5, wobei die Dosis der Cluster-Ionen (16) aus Kohlenstoff  $2,0 \times 10^{14}$  Atome / cm<sup>2</sup> oder mehr ist.
7. Halbleiter-Epitaxiewafer (100, 200), umfassend:  
 einen Halbleiter-Wafer (10, 12); eine Modifizierungsschicht (18) aus einem bestimmten Element, enthalten als feste Lösung, in dem Halbleiter-Wafer (10, 12), wobei die Modifizierungsschicht (18) in einem Oberflächenbereich (10A) des Halbleiter-Wafers (10, 12) gebildet ist; und eine Silicium-Epitaxieschicht (20) auf der Modifizierungsschicht (18),  
 wobei die Halbwertsbreite des Konzentrationsprofils des bestimmten Elements in der Tiefenrichtung der Modifizierungsschicht (18) 100 nm oder weniger ist, und der Trübungswert des Oberflächenbereichs (10A) der Silicium-Epitaxieschicht (20) 0,30 ppm oder weniger ist, wobei der Trübungswert definiert ist als der Mittelwert des erhaltenen Trübungswerts der Oberfläche des Halbleiter-Wafers (10, 12), gemessen mit der Oberflächendefekt-Inspektionsvorrichtung SP-1 von KLA-Tencor Corporation, im „DWN“-Modus.
8. Halbleiter-Epitaxiewafer (100, 200) gemäß Anspruch 7, wobei der Halbleiter-Wafer (10) ein Siliciumwafer ist.
9. Halbleiter-Epitaxiewafer (200) gemäß Anspruch 7, wobei der Halbleiter-Wafer (10) ein epitaxialer Siliciumwafer ist, in dem eine epitaxiale Siliciumschicht (14) auf einer Oberfläche eines Siliciumwafers (12) gebildet ist und die Modifizierungsschicht (18) in dem Oberflächenbereich (10A) der epitaxialen Siliciumschicht (14) platziert ist.

10. Halbleiter-Epitaxiewafer (100, 200) gemäß einem der Ansprüche 7 bis 9, wobei der Spitzenwert des Konzentrationsprofils in der Modifizierungsschicht (18) in einer Tiefe innerhalb von 150 nm von der Oberfläche des Halbleiter-Wafers (10, 12) liegt.

11. Halbleiter-Epitaxiewafer (100, 200) gemäß einem der Ansprüche 7 bis 10, wobei die Spitzenkonzentration des Konzentrationsprofils der Modifizierungsschicht (18)  $1 \times 10^{15}$  Atome / cm<sup>3</sup> oder mehr beträgt.

12. Halbleiter-Epitaxiewafer (100, 200) gemäß einem der Ansprüche 7 bis 11, wobei das bestimmte Element Kohlenstoff ist.

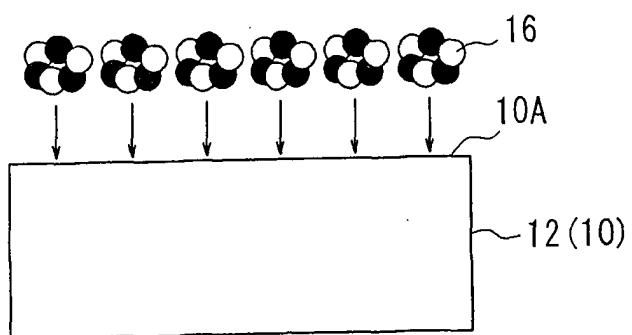
13. Halbleiter-Epitaxiewafer (100, 200) gemäß Anspruch 12, wobei das bestimmte Element mindestens zwei Arten von Elementen einschließlich Kohlenstoff umfasst.

14. Verfahren zur Herstellung einer Festkörper-Bildsensorvorrichtung, wobei eine Festkörper-Bildsensorvorrichtung gebildet wird in einer Epitaxieschicht (20) in dem Oberflächenbereich des Epitaxiewafers, der durch das Herstellungsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6 hergestellt worden ist, oder des Epitaxiewafers nach einem der Ansprüche 7 bis 13.

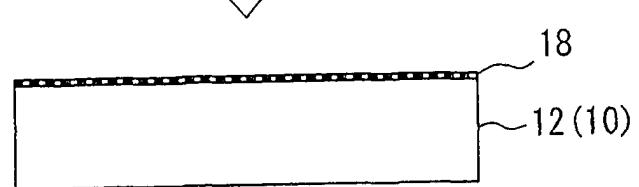
Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

*FIG. 1A*



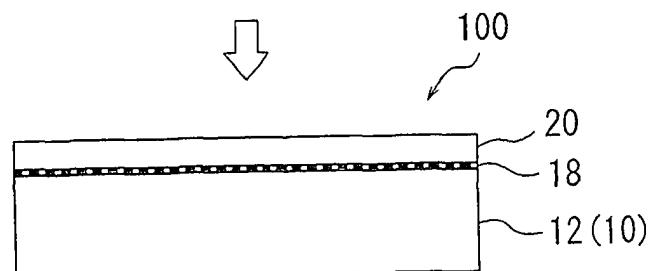
*FIG. 1B*



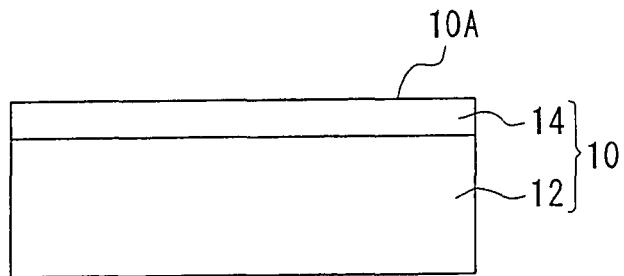
*FIG. 1C*

Wiederherstellungs-  
wärmebehandlung

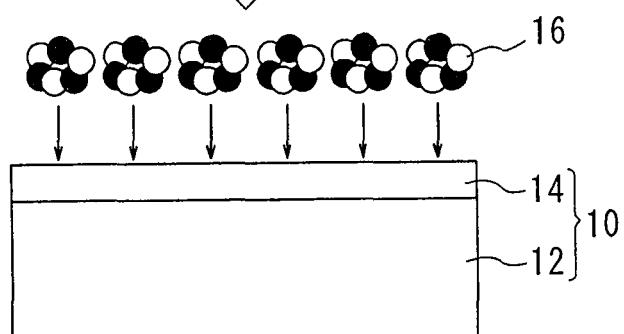
*FIG. 1D*



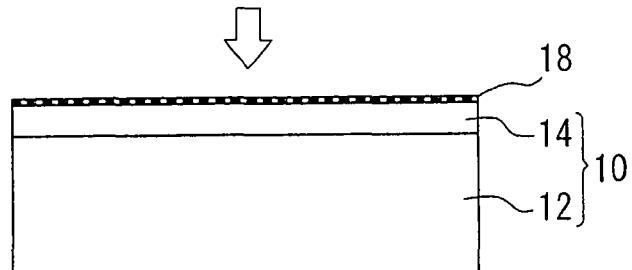
*FIG. 2A*



*FIG. 2B*



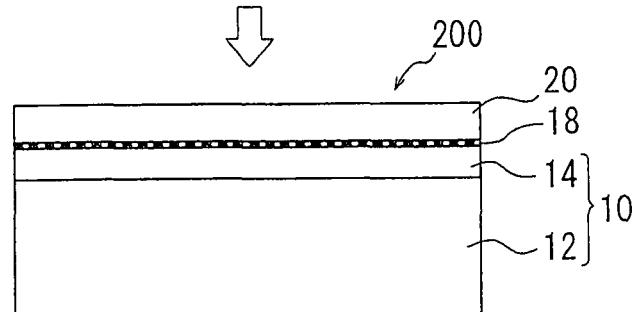
*FIG. 2C*



*FIG. 2D*

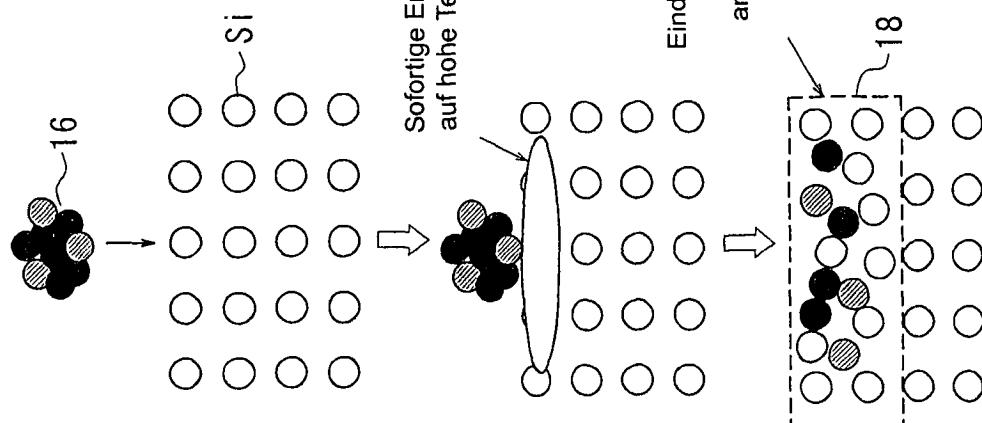
Wiederherstellungs-  
wärmbehandlung

*FIG. 2E*

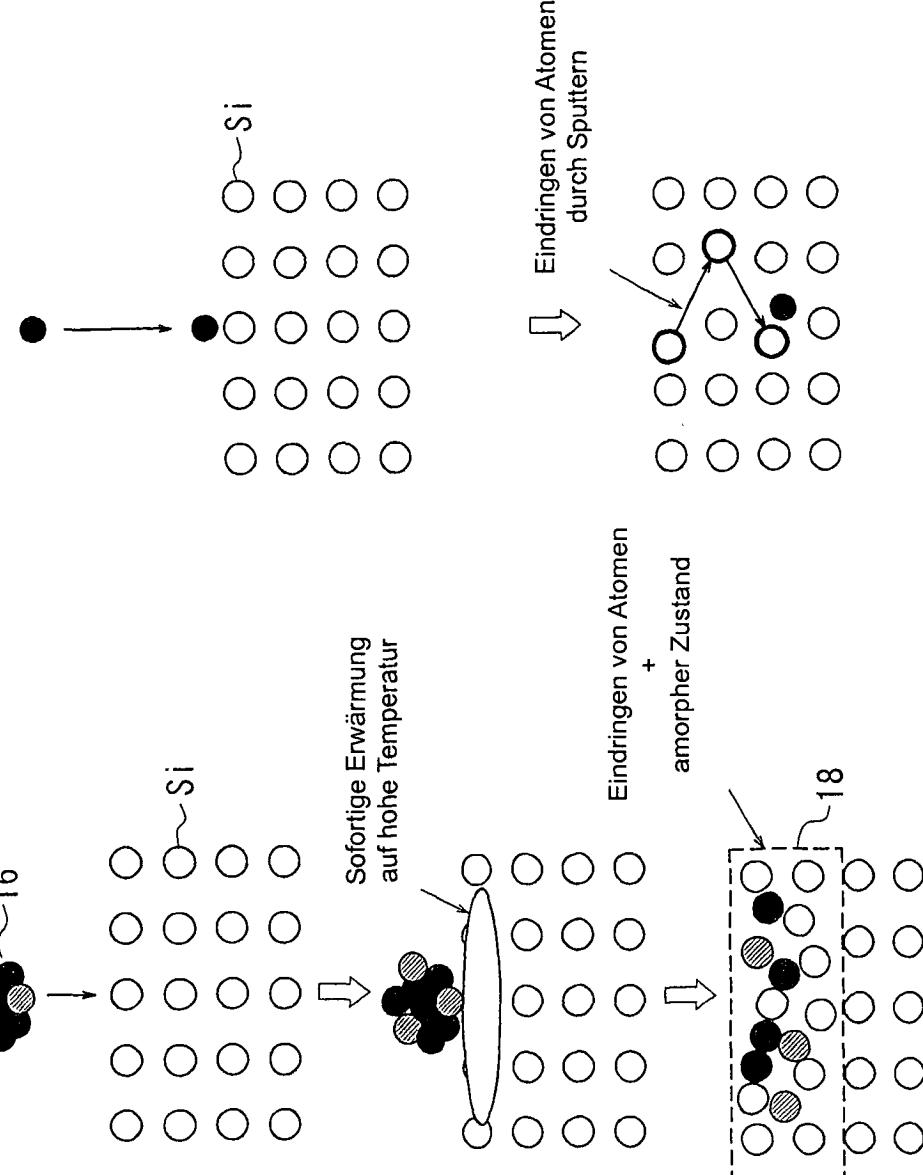


*FIG. 3A*

Cluster-Ionenbestrahlung

*FIG. 3B*

Monomer-Ionenimplantation



*FIG. 4*

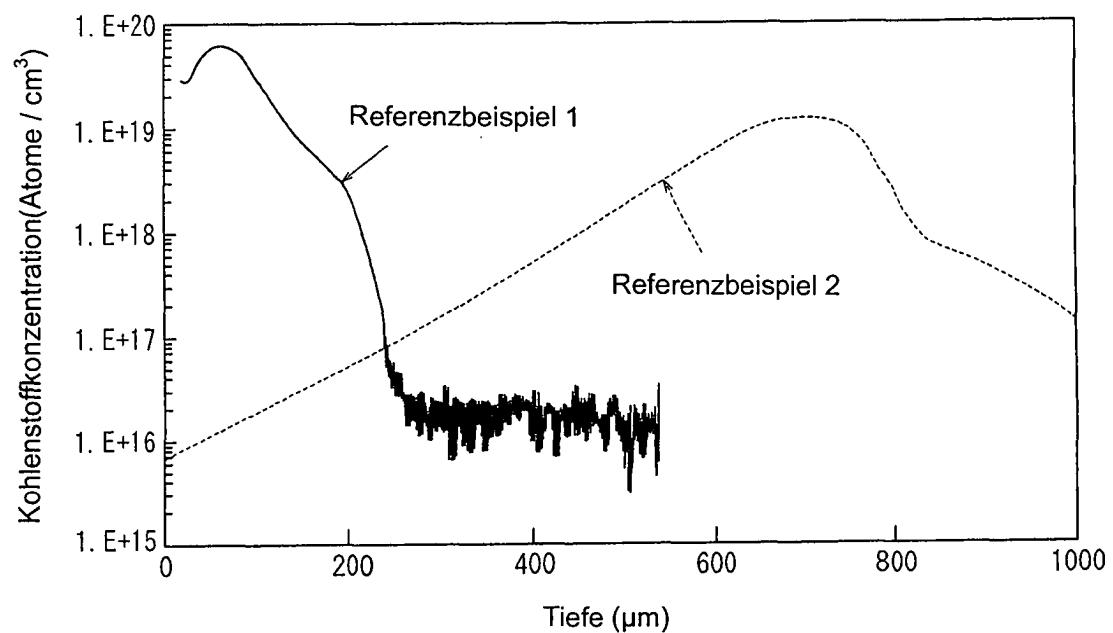


FIG. 5A

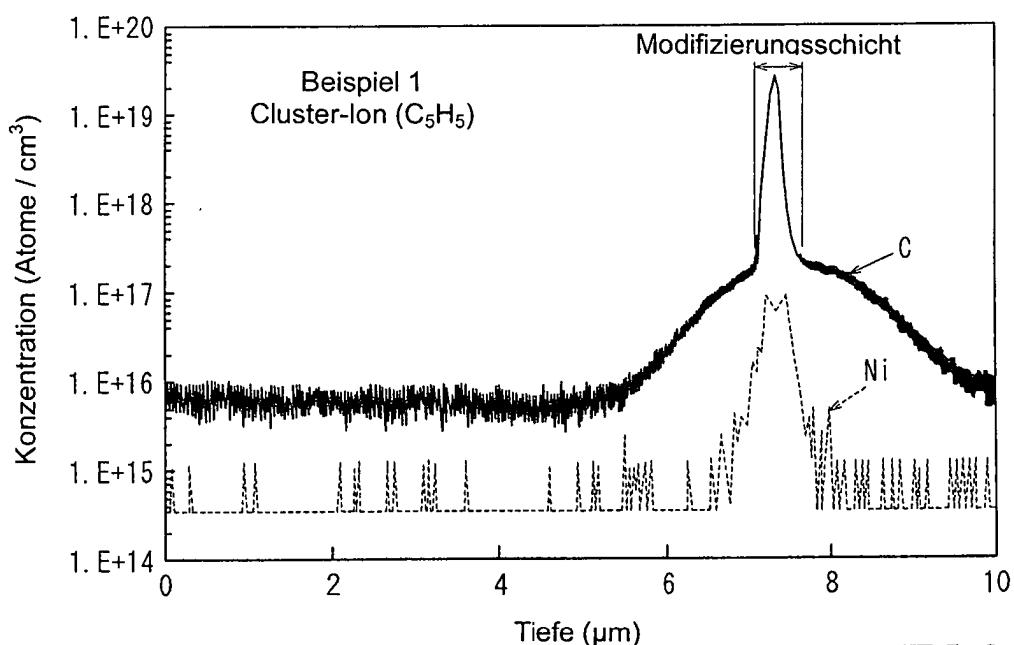


FIG. 5B

