



(10) **DE 11 2013 006 244 B4** 2020.03.05

(12)

Patentschrift

(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2013 006 244.5**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US2013/077491**
(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2014/105828**
(86) PCT-Anmeldetag: **23.12.2013**
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **03.07.2014**
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
in deutscher Übersetzung: **08.10.2015**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **05.03.2020**

(51) Int Cl.: **H01L 21/84 (2006.01)**
H01L 21/265 (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:
61/746,822 28.12.2012 US

(73) Patentinhaber:
GlobalWafers Co., Ltd., Hsinchu, TW

(74) Vertreter:
**Maiwald Patentanwalts- und
Rechtsanwalts-gesellschaft mbH, 80335 München,
DE**

(72) Erfinder:
**Libbert, Jeffrey Louis, St. Peters, Mo., US; Ries,
Michael J., St. Peters, Mo., US**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

US	2007 / 0 037 363	A1
US	2007 / 0 212 852	A1
US	2010 / 0 127 343	A1
US	5 189 500	A

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Herstellung einer Verbundstruktur**

(57) Hauptanspruch: Ein Verfahren zur Herstellung einer Verbundstruktur, das Verfahren umfassend der Reihenfolge nach die folgenden Schritte:

(a) Implantieren von Heliumionen durch eine Frontoberfläche eines monokristallinen Siliciumsubstrats, wobei das monokristalline Siliciumsubstrat zwei hauptsächlich parallele Hauptflächen, von denen die eine eine Frontoberfläche des monokristallinen Siliciumsubstrats ist, und von denen die andere eine Rückseitenoberfläche des monokristallinen Siliciumsubstrats ist, eine Umfangskante, welche die Front- und Rückseitenoberflächen verbindet, und eine Mittelebene zwischen der Front- und Rückseitenoberfläche umfasst, und wobei die Heliumionen in eine Durchschnittstiefe D_1 von 0,02 Mikrometer bis 1 Mikrometer implantiert werden, gemessen ausgehend von der Frontoberfläche in Richtung der Mittelebene;

(b) Implantieren von Wasserstoffionen durch die Frontoberfläche des monokristallinen Siliciumsubstrats in eine Durchschnittstiefe D_2 von 0,02 Mikrometer bis 1 Mikrometer, gemessen ausgehend von der Frontoberfläche in Richtung der Mittelebene, und wobei die Durchschnittstiefe D_1 und die Durchschnittstiefe D_2 innerhalb von 100 Nanometern liegen;

(c) Aushärten des monokristallinen Siliciumsubstrats bei einer Temperatur von 200°C bis 350°C für eine Dauer von 2 Stunden bis 10 Stunden um eine Spaltebene im monokristallinen Siliciumsubstrat zu erzeugen, wobei die Spaltebe-

ne eine Durchschnittstiefe gleich D_1 , D_2 , oder einem Wert zwischen D_1 und D_2 hat;

(d) ...

Beschreibung**GEBIET DER ERFINDUNG**

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft generell ein Verfahren zur Herstellung von Mehrschicht-Halbleitereinheiten. Speziell betrifft die vorliegende Erfindung ein Verfahren zur Herstellung einer Verbundstruktur.

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

[0002] Halbleiterwafer werden üblicherweise aus einem Einkristallbarren (z.B. einem Siliciumbarren) hergestellt, der getrimmt und geschliffen wird, um eine oder mehrere Flächen oder Kerben zu bekommen, um eine korrekte Orientierung des Wafers in anschließenden Verarbeitungsschritten zu gewährleisten. Der Barren wird dann in einzelne Wafer zerschnitten. Obgleich hier Halbleiterwafer aus Silicium geschildert werden, können auch andere Materialien verwendet werden, um Halbleiterwafer herzustellen, wie beispielsweise Germanium, Siliciumcarbid, Siliciumgermanium, oder Galliumarsenid.

[0003] Halbleiterwafer (z.B. Siliciumwafer) können zur Herstellung von Verbundschichtstrukturen verwendet werden. Eine Verbundschichtstruktur (z.B. eine SOI-Struktur) umfasst üblicherweise ein Trägerwafer oder eine Trägerschicht, eine Bauelementschicht, und einen isolierenden (d.h. dielektrischen) Film (typischerweise eine Oxidschicht) zwischen der Trägerschicht und der Bauelementschicht. Üblicherweise ist die Bauelementschicht zwischen 0,05 und 20 Mikrometer dick. Allgemein werden Verbundschichtstrukturen, wie beispielsweise Silicon-on-Insulator (SOI), Silicon-on-Sapphire (SOS), und Silicium auf Quarz, hergestellt indem zwei Wafer in engen Kontakt zueinander gebracht werden, gefolgt von einer thermischen Behandlung um die Bindung zu verstärken.

[0004] Nach dem thermischen Aushärten, wird die Verbundstruktur einer Weiterverarbeitung unterzogen, um einen wesentlichen Teil des Donorwafers zu entfernen und so einen Schichttransfer zu erreichen. Zum Beispiel können Techniken zur Verdünnung des Wafers verwendet werden, z.B. Ätzen oder Schleifen, was oft als Back-Etch SOI (d.h. BESOI) bezeichnet wird. Dabei wird ein Siliciumwafer auf einen Trägerwafer gebunden und dann langsam weggeätzt bis nur noch eine dünne Schicht Silicium auf dem Trägerwafer übrig ist (siehe z.B. US 5 189 500 A, das in seiner Gesamtheit hiermit durch Verweis eingebunden wird). Dieses Verfahren ist zeitaufwändig und kostspielig, verschwendet eines der Substrate und bringt generell keine geeignete Gleichförmigkeit der Dicke bei Schichten, die dünner als einige Mikrometer sind.

[0005] Ein anderes übliches Verfahren zum Schichttransfer verwendet die Implantation von Wasserstoff, gefolgt von einer thermisch induzierten Schichtspaltung. Partikel (z.B. Wasserstoffatome oder eine Kombination aus Wasserstoff- und Heliumatomen) werden in einer vorgegebenen Tiefe unter der Vorderseite des Donorwafers implantiert. Die implantierten Partikel bilden eine Spaltebene im Donorwafer in der vorgegebenen Tiefe, in der sie implantiert wurden. Die Oberfläche des Donorwafers wird gereinigt, um organische Verbindungen zu entfernen, die sich während des Implantationsverfahrens auf dem Wafer abgelagert haben.

[0006] Die Vorderseite des Donorwafers wird dann mittels eines hydrophilen Bindeverfahrens auf einen Trägerwafer gebunden, so dass ein Verbundwafer gebildet wird. Der Donorwafer und/oder Trägerwafer wird aktiviert, indem die Waferoberflächen einem Plasma enthaltend zum Beispiel Sauerstoff oder Stickstoff ausgesetzt werden. Der Kontakt mit dem Plasma verändert die Struktur der Oberflächen in einem Prozess, der oft als Oberflächenaktivierung bezeichnet wird. Dieser Aktivierungsprozess macht die Oberflächen von einem oder beiden von Donorwafer und Trägerwafer hydrophil. Die Wafer werden dann zusammengepresst und es bildet sich eine Verbindung zwischen ihnen. Diese Verbindung ist relativ schwach und muss verstärkt werden, bevor eine Weiterverarbeitung stattfinden kann.

[0007] In einigen Verfahren wird die hydrophile Bindung zwischen dem Donorwafer und dem Trägerwafer (d.h., in einem Verbundwafer) dadurch verstärkt, dass das Verbundwafer-Paar erhitzt oder ausgehärtet wird bei Temperaturen zwischen etwa 300°C und 500°C. Die erhöhten Temperaturen verursachen die Ausbildung von kovalenten Bindungen zwischen den aufeinanderliegenden Oberflächen des Donorwafers und des Trägerwafers, wodurch die Verbindung zwischen dem Donorwafer und dem Trägerwafer verfestigt wird. Mit dem Erhitzen oder Aushärten des Verbundwafers schwächen die zuvor in den Donorwafer implantierten Partikel die Spaltebene.

[0008] Ein Teil des Donorwafers wird dann entlang der Spaltebene aus dem Verbundwafer abgetrennt (d.h. abgespalten), um den SOI-Wafer zu erhalten. Die Spaltung kann durchgeführt werden, indem der Verbundwafer in einer Halterung befestigt wird, durch die eine mechanische Kraft senkrecht auf die gegenüberliegenden Seiten des Verbundwafers ausgeübt wird, um einen Teil des Donorwafers vom Verbundwafer abzureißen. Bei einigen Verfahren werden Saugnäpfe verwendet, um die mechanische Kraft auszuüben. Die Abtrennung des Teils des Donorwafers wird eingeleitet durch das Ansetzen eines mechanischen Keils an der Kante des Verbundwafers an der Stelle, an der die Spaltebene liegt, um die Ausbreitung eines Risses entlang der Spaltebene zu ver-

ursachen. Die mechanische Kraft, die durch die Saugnapfe ausgeübt wird, reißt dann den Teil des Donorwafers vom Verbundwafer weg, wodurch ein SOI-Wafer entsteht.

[0009] In anderen Verfahren kann das Verbundpaar stattdessen über einen gewissen Zeitraum einer erhöhten Temperatur ausgesetzt werden, um den Teil des Donorwafers vom Verbundwafer zu trennen. Die erhöhte Temperatur, der das Verbundpaar ausgesetzt wird, verursacht die Entstehung und Ausbreitung eines Risses entlang der Spaltebene, wodurch ein Teil des Donorwafers abgetrennt wird. Dieses Verfahren erlaubt eine bessere Gleichförmigkeit der übertragenen Schicht, und es erlaubt ein Recycling des Donorwafers, aber es erfordert typischerweise ein Erhitzen des implantierten und miteinander verbundenen Paares auf Temperaturen nahe 500°C. Für unähnliche Materialien (Silicium auf Saphir oder Silicium auf Quarz) kann diese Temperatur zu hoch dafür sein, dass die Substrate die Spannungen überleben, welche durch die ungleichen thermischen Expansionskoeffizienten verursacht werden. Es wurden verschiedene Methoden zur Senkung der für die Einleitung der Spaltung erforderlichen Temperatur in der Literatur diskutiert, unter anderem eine Erhöhung der Wasserstoffdosis und eine Koimplantation von Wasserstoffionen und Borionen. Höhere Wasserstoffdosen erfordern längere Implantationszeiten, was zu höheren Kosten führt. Bei der Koimplantation von Bor und Wasserstoff könnten zusätzliche Schritte erforderlich werden, um das überschüssige Bor in der übertragenen Schicht zu entfernen, da dies zu unerwünschten Veränderungen in der Resistivität der oberen Schicht führen kann.

[0010] US 2007 / 0 212 852 A1 beschreibt ein Verfahren zur Herstellung eines dünnen Films.

[0011] US 2007 / 0 037 363 A1 beschreibt ein Verfahren zur Herstellung einer Dünnschicht, bei dem man eine versenkte fragile Zone durch Implantation einer chemischen Spezies in einem Substrat erzeugt.

[0012] US 2010 / 0 127 343 A1 beschreibt ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Bilden eines Halbleiters auf einer Glaskeramikstruktur.

[0013] US 5 189 500 A offenbart eine Mehrschicht-Halbleitervorrichtung, bei der eine Mehrzahl von Halbleiterschichten in vertikal entgegengesetzten Richtungen ausgebildet sind.

KURZE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

[0014] Zu den Aspekten der vorliegenden Offenbarung gehört ein Verfahren zur Herstellung eines monokristallinen Donorsubstrats mit zwei generell parallelen Hauptflächen, von denen die eine eine Frontoberfläche des Donorsubstrats ist, und von denen

die andere eine Rückseitenoberfläche des Donorsubstrats ist, einer Umfangskante, welche die Front- und Rückseitenoberflächen verbindet, und einer Mittelebene zwischen der Front- und Rückseitenoberfläche. Das Verfahren umfasst (a) Implantieren von Heliumionen durch die Frontoberfläche des monokristallinen Donorsubstrats in eine Durchschnittstiefe D_1 , gemessen ausgehend von der Frontoberfläche in Richtung der Mittelebene; (b) Implantieren von Wasserstoffionen durch die Frontoberfläche des monokristallinen Donorsubstrats in eine Durchschnittstiefe D_2 , gemessen ausgehend von der Frontoberfläche in Richtung der Mittelebene; und (c) Aushärten des monokristallinen Donorsubstrats bei einer Temperatur, die ausreicht um eine Spaltebene im monokristallinen Donorsubstrat zu erzeugen. Die Durchschnittstiefe D_1 und die Durchschnittstiefe D_2 liegen innerhalb von etwa 100 nm.

[0015] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung einer Verbundstruktur, das Verfahren umfassend der Reihenfolge nach die folgenden Schritte: (a) Implantieren von Heliumionen durch eine Frontoberfläche eines monokristallinen Siliciumsubstrats, wobei das monokristalline Siliciumsubstrat zwei hauptsächlich parallele Hauptflächen, von denen die eine eine Frontoberfläche des monokristallinen Siliciumsubstrats ist, und von denen die andere eine Rückseitenoberfläche des monokristallinen Siliciumsubstrats ist, eine Umfangskante, welche die Front- und Rückseitenoberflächen verbindet, und eine Mittelebene zwischen der Front- und Rückseitenoberfläche umfasst, und wobei die Heliumionen in eine Durchschnittstiefe D_1 von 0,02 Mikrometer bis 1 Mikrometer implantiert werden, gemessen ausgehend von der Frontoberfläche in Richtung der Mittelebene; (b) Implantieren von Wasserstoffionen durch die Frontoberfläche des monokristallinen Siliciumsubstrats in eine Durchschnittstiefe D_2 von 0,02 Mikrometer bis 1 Mikrometer, gemessen ausgehend von der Frontoberfläche in Richtung der Mittelebene, und wobei die Durchschnittstiefe D_1 und die Durchschnittstiefe D_2 innerhalb von 100 Nanometern liegen; (c) Aushärten des monokristallinen Siliciumsubstrats bei einer Temperatur von 200°C bis 350°C für eine Dauer von 2 Stunden bis 10 Stunden um eine Spaltebene im monokristallinen Siliciumsubstrat zu erzeugen, wobei die Spaltebene eine Durchschnittstiefe gleich D_1 , D_2 , oder einem Wert zwischen D_1 und D_2 hat; (d) Verbinden der Frontoberfläche des monokristallinen Siliciumsubstrats mit der darin befindlichen Spaltebene mit einer Oberfläche eines Trägersubstrats, so dass die Verbundstruktur entsteht, wobei das Trägersubstrat ein Halbleiterwafer ist, der ein Material ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Silicium, Saphir, Quarz, Galliumarsenid, Siliciumcarbid, Siliciumgermanium, und Germanium enthält; und (e) Aushärten der Verbundstruktur bei einer Temperatur zwischen 150°C und 350°C für eine Dauer zwischen 30 Minuten und 5 Stunden.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

[0016] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung einer Verbundschichtstruktur. Das erfindungsgemäße Verfahren erlaubt vorteilhafterweise ein Niedrigtemperatur-Aushärten, nachdem das Donorsubstrat und das Trägersubstrat miteinander verbunden wurden und bevor die Schichten getrennt werden. Das Niedrigtemperatur-Aushärten vermindert Spannungen, wie zum Beispiel die Spannungen, die sich aus unterschiedlicher thermischer Expansion in Strukturen enthaltend miteinander verbundene unähnliche Donor- und Trägersubstrate ergeben. Solche Spannungen können zu Brüchen in einem oder beiden Substraten führen.

[0017] Nach dem erfindungsgemäßen Verfahren bildet eine Implantation von Heliumionen und Wasserstoffionen eine Schadensschicht im Donorsubstrat, welche dann durch ein Hochtemperatur-Aushärten thermisch aktiviert wird. In einigen Ausführungsformen verwendet das erfindungsgemäße Verfahren einen Implantation von Heliumionen, gefolgt von einer Implantation von Wasserstoffionen, zur Ausbildung einer Schadensschicht im Donorsubstrat, gefolgt von einem Aushärten bei relativ hoher Temperatur, um eine Spaltebene zu bilden. In einigen Ausführungsformen verwendet das erfindungsgemäße Verfahren eine gleichzeitige Ko-Implantation von Wasserstoffionen und Heliumionen, um eine Schadensschicht im Donorsubstrat zu bilden, gefolgt von einem Aushärten bei relativ hoher Temperatur, um eine Spaltebene zu bilden. In einigen Ausführungsformen verwendet das erfindungsgemäße Verfahren einen Implantation von Wasserstoffionen, gefolgt von einer Implantation von Heliumionen, zur Ausbildung einer Schadensschicht im Donorsubstrat, gefolgt von einem Aushärten bei relativ hoher Temperatur, um eine Spaltebene zu bilden. In bevorzugten Ausführungsformen findet ein Hochtemperatur-Aushärten nach der Implantation von Helium- und Wasserstoffionen in das Donorsubstrat und vor dem Verbinden der Wafer. Da der Donorwafer nicht an ein andere Substrat (z.B. das Trägersubstrat) gebunden ist, kann das Aushärten bei einer Temperatur erfolgen, die höher ist als es für ein Verbundpaar aus unähnlichen Materialien wie zum Beispiel Silicium und Saphir zulässig sein könnte. Ohne an eine bestimmte Theorie gebunden sein zu wollen, scheint die Ausbildung der Spaltebene ein thermisch aktivierter Prozess zu sein. Daher könnte die Fähigkeit, die Ausbildung der Spaltebene bereits vor dem Verbinden durchzuführen, bei einer höheren Temperatur, den Zeitaufwand und die Spannung deutlich zu verringern, welche erforderlich sind, um einen Bruch entlang der Spaltebene während des Aushärtens der Verbindung zu verursachen.

[0018] Die Substrate zur Verwendung in der vorliegenden Erfindung umfassen ein monokristallines Do-

norsubstrat und ein Trägersubstrat. Im Allgemeinen umfasst das monokristalline Donorsubstrat zwei generell parallele Hauptflächen, von denen die eine eine Frontoberfläche des Substrats ist, und von denen die andere eine Rückseitenoberfläche des Substrats ist, einer Umfangskante, welche die Front- und Rückseitenoberflächen verbindet, und einer Mittelebene zwischen der Front- und Rückseitenoberfläche. Bevor einer der hier beschriebenen Behandlungen durchgeführt wird, können die Frontoberfläche und die Rückseitenoberfläche des Substrats im Wesentlichen identisch sein. Eine Oberfläche wird nur zur Vereinfachung als „Frontoberfläche“ oder als „Rückseitenoberfläche“ bezeichnet, und um die Oberfläche zu unterscheiden, an der die Behandlungen aus dem erfindungsgemäßen Verfahren durchgeführt werden. Wie in dieser Beschreibung durchgängig beschrieben, soll ein solcher Behandlungen, z.B. Ionenimplantation, Aktivierung durch Sauerstoffplasma etc., an der Frontoberfläche des Substrats geschehen. Diese Namens-Konvention schließt nicht aus, dass identische Behandlungen oder unterschiedliche Behandlungen auf der Rückseitenoberfläche des Donorsubstrats durchgeführt werden.

[0019] In einigen Ausführungsformen umfasst das monokristalline Donorsubstrat einen Halbleiterwafer. In bevorzugten Ausführungsformen enthält der Halbleiterwafer ein Material ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Silicium, Galliumarsenid, Galliumnitrid, Aluminiumgalliumnitrid, Indiumphosphid, Siliciumcarbid, Siliciumgermanium, Germanium, und Kombinationen davon. In besonders bevorzugten Ausführungsformen umfasst der Halbleiterwafer einen Wafer, der von einem Einkristall-Siliciumwafer abgeschnitten wurden, der von einem Einkristall-Barren abgeschnitten wurde, welcher nach konventionellen Czochralski-Kristallzüchtungsverfahren hergestellt wurde. Solche Verfahren, ebenso wie übliche Techniken zum Schneiden von Silicium, Läppen, Ätzen, und Polieren werden zum Beispiel beschrieben in F. Shimura, Semiconductor Silicon Crystal Technology, Academic Press, 1989, und Silicon Chemical Etching, (J. Grabmaier Hrsg.) Springer-Verlag, N.Y., 1982 (hier durch Verweis einbezogen).

[0020] In einigen Ausführungsformen können die Hauptoberflächen des Donorwafers vor der Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens unbehandelt sein. Das bedeutet dass der Donorwafer geschnitten und poliert sein kann, aber nicht weiterbehandelt mit dem Resultat einer Oxid- oder Nitridschicht. In einigen Ausführungsformen umfasst der Donorwafer lediglich eine native Siliciumoxidschicht. In einigen Ausführungsformen können eine oder mehrere der Hauptoberflächen des Donorwafers vor der Ionenimplantation oxidiert werden. In bevorzugten Ausführungsformen wird die Frontoberflächenschicht, d.h. die Schicht, durch welche Helium- und Wasserstoffionen implantiert werden, vor der Ionen-

implantation oxidiert. Es ist erstrebenswert, eine thermale Schnittstelle an den obersten Silicium/BOX-Schnittstellen zu haben, um die Schnittstellendichte gering zu halten. Der Donorwafer sollte nach der Implantation nicht bei einer erhöhten Temperatur oxidiert werden, weil das Waferblister verursachen kann. In einigen Ausführungsformen können eine oder mehrere der Hauptoberflächen des Donorwafers vor der Ionenimplantation nitriert werden. In bevorzugten Ausführungsformen wird die Frontoberflächenschicht, d.h. die Schicht, durch welche Helium- und Wasserstoffionen implantiert werden, vor der Ionenimplantation nitriert.

[0021] Der Donorwafer kann thermisch in einem Ofen wie dem ASM A400 oxidiert werden. Die Temperatur kann von 750°C bis 1100°C in einer oxidierenden Umgebung betragen. Die oxidierende Umgebungsatmosphäre kann eine Mischung aus inertem Gas, wie beispielsweise Ar oder N₂, und O₂ sein. Der Sauerstoffgehalt kann von 1 bis 10 Prozent oder höher variieren. In einigen Ausführungsformen kann die oxidierende Umgebungsatmosphäre bis hinauf zu 100% sein (eine „Trockenoxidation“). In einigen Ausführungsformen kann die Umgebungsatmosphäre eine Mischung aus inertem Gas, wie beispielsweise Ar oder N₂, und oxidierenden Gasen, wie beispielsweise O₂ und Wasserdampf sein (eine „Feuchtoxidation“). In einer beispielhaften Ausführungsform können Donorwafer in einen Vertikalofen wie den A400 geladen werden. Die Temperatur wird mit einer Mischung aus N₂ und O₂ auf die Oxidationstemperatur gesteigert. Bei der gewünschten Temperatur wird Wasserdampf in den Gasstrom eingebracht. Nachdem die gewünschte Oxiddicke erreicht wurde, werden der Wasserdampf und das O₂ abgestellt, und die Ofentemperatur wird verringert, und Wafer werden aus dem Ofen geholt.

[0022] Nach der Oxidation ist eine Waferreinigung optional. Falls gewünscht können die Wafer zum Beispiel in einer Standard-SC1/ SC2-Lösung gereinigt werden.

[0023] Gemäß des Verfahrens der vorliegenden Erfindung wird ein Donorsubstrat wie beispielsweise ein Halbleiterwafer, das geätzt und poliert und optional oxidiert wurde, einer Ionenimplantation unterzogen, um eine Schadensschicht im Donorsubstrat zu erzeugen. Ionenimplantation kann in einem kommerziell erhältlichen Instrument durchgeführt werden, wie beispielsweise einem Applied Materials Quantum II. In einigen Ausführungsformen umfasst das Verfahren das Implantieren von Heliumionen (z.B. He⁺-Ionen) durch die Frontoberfläche des monokristallinen Donorsubstrats in eine Durchschnittstiefe D₁ gemessen ausgehend von der Frontoberfläche in Richtung der Mittelebene. Die Durchschnittstiefe D₁ der implantierten Heliumionen kann sich im Bereich von etwa 0,02 Mikrometer bis etwa 1 Mikrometer befinden, ab-

hängig von der gewünschten Dicke der übertragenen Schicht. Die gewünschte Tiefe der implantierten Heliumionen kann relativ zum Maximum des implantierten Wasserstoffs betrachtet werden, weil die Schicht mit implantiertem Wasserstoff die Hauptrolle bei der Festlegung der schließlichen Tiefe der übertragenen Schicht spielt. Bevorzugt sollte die maximale Konzentration von implantiertem He innerhalb von etwa +/- 100 nm bezogen auf das Maximum des implantierten Wasserstoffs liegen, mehr bevorzugt innerhalb von etwa +/- 50 nm, und noch mehr bevorzugt innerhalb von etwa +/- 10 nm bezogen auf das Maximum des implantierten Wasserstoffs. In einigen Ausführungsformen liegt die Gesamtdosis an implantierten Heliumionen im Bereich von etwa 0,5×10¹⁶ Heliumionen/cm² bis etwa 2×10¹⁶ Heliumionen/cm², bevorzugt bei etwa 1×10¹⁶ Heliumionen/cm². Heliumimplantation geschieht generell bei einer Implantationsenergie, die ausreichend ist um die gewünschte Implantationstiefe für He zu erreichen, wie beispielsweise zwischen etwa 10 keV und etwa 50 keV, wie beispielsweise von etwa 20 keV bis etwa 40 keV, wie beispielsweise etwa 27 keV oder etwa 36 keV.

[0024] In einigen Ausführungsformen umfasst das Verfahren das Implantieren von Wasserstoffionen (z.B. H⁺-Ionen) durch die Frontoberfläche des monokristallinen Donorsubstrats in eine Durchschnittstiefe D₂ gemessen ausgehend von der Frontoberfläche in Richtung der Mittelebene. Die Durchschnittstiefe D₂ der implantierten Wasserstoffionen kann sich im Bereich von etwa 0,02 Mikrometer bis etwa 1 Mikrometer befinden. In einigen Ausführungsformen liegt die Gesamtdosis an implantierten Wasserstoffionen im Bereich von etwa 0,5×10¹⁶ Wasserstoffionen/cm² bis etwa 3×10¹⁶ Wasserstoffionen/cm², bevorzugt etwa 1×10¹⁶ Wasserstoffionen/cm². Wasserstoffimplantation geschieht generell bei einer Implantationsenergie, die ausreichend ist um die gewünschte Implantationstiefe für Wasserstoffionen zu erreichen, wie beispielsweise zwischen etwa 20 keV und etwa 60 keV, wie beispielsweise zwischen etwa 30 keV und etwa 50 keV, wie beispielsweise etwa 37 keV oder etwa 48 keV.

[0025] Die Heliumimplantation kann vor, gleichzeitig mit, oder nach der Wasserstoffimplantation erfolgen. In bevorzugten Ausführungsformen erfolgt die Heliumimplantation vor der Wasserstoffimplantation.

[0026] In einigen Ausführungsformen kann es wünschenswert sein, Wafer nach der Implantation zu reinigen. In einigen bevorzugten Ausführungsformen könnte die Reinigung eine Piranha-Reinigung umfassen, gefolgt von einer DI-Waferspülung und SC1/ SC2-Reinigungen.

[0027] In einigen Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung wird das monokristalline Donorsubstrat mit der darin durch die Heliumionen- und

Wasserstoffionenimplantation gebildeten Schadensschicht bei einer Temperatur ausgehärtet, die ausreicht um eine thermisch aktivierte Spaltebene in dem monokristallinen Donorsubstrat zu bilden. Ein Beispiel für ein geeignetes Werkzeug könnte ein einfacher Box-Ofen sein, wie beispielsweise ein Blue M-Modell. In einigen bevorzugten Ausführungsformen wird die implantierte Donorstruktur bei einer Temperatur von etwa 200°C bis etwa 350°C, von etwa 225°C bis etwa 325°C, bevorzugt bei etwa 300°C ausgehärtet. Die thermische Aushärtung kann über eine Dauer von etwa 2 Stunden bis etwa 10 Stunden erfolgen, bevorzugt über eine Dauer von etwa 8 Stunden. Ein thermisches Aushärten innerhalb dieser Temperaturen ist ausreichend, um eine thermisch aktivierte Spaltebene zu bilden, die mit der durch die Ko-Implantation von Wasserstoff und Helium geformten Schadensschicht korrespondiert. In einigen Ausführungsformen hat die Spaltebene eine Durchschnittstiefe, die im Wesentlichen gleich zu D_1 und D_2 ist, die in der bevorzugten Ausführungsform einen im Wesentlichen gleichen Abstand von der Frontoberfläche des Wafers haben.

[0028] Nach dem thermischen Aushärten zur Aktivierung der Spaltebene wird die Oberfläche des monokristallinen Donorsubstrats bevorzugt gereinigt.

[0029] In einigen bevorzugten Ausführungsformen der Erfindung wird das gereinigte monokristalline Donorsubstrat mit der darin befindlichen thermisch aktivierten Spaltebene einer Sauerstoffplasma-Oberflächenaktivierung unterzogen. In einigen Ausführungsformen ist die Vorrichtung zur Sauerstoffplasma-Oberflächenaktivierung eine kommerziell erhältliche Vorrichtung, wie beispielsweise die Vorrichtungen, die von der EV Group erhältlich sind, wie beispielsweise das EVG®810LT Low Temp Plasma Activation System. Der Donorwafer mit der thermisch aktivierten Spaltebene wird in die Kammer gegeben. Die Kammer wird evakuiert und mit O_2 wiederbefüllt auf einen Druck unterhalb Atmosphärendruck, um so ein Plasma zu erzeugen. Der Wafer wird diesem Plasma für die gewünschte Zeit ausgesetzt, die sich im Bereich von etwa 1 Sekunde bis etwa 120 Sekunden befinden kann.

[0030] Sauerstoffplasma-Oberflächenoxidation wird ausgeführt, um die Frontoberfläche des monokristallinen Donorsubstrats hydrophil zu machen und so zur Bindung an ein Trägersubstrat zu befähigen. Das Trägersubstrat umfasst wie das Donorsubstrat im Allgemeinen zwei generell parallele Hauptflächen, von denen die eine eine Frontoberfläche des Substrats ist, und von denen die andere eine Rückseitenoberfläche des Substrats ist, eine Umfangskante, welche die Front- und Rückseitenoberflächen verbindet, und eine Mittelebene zwischen der Front- und Rückseitenoberfläche. In einigen Ausführungsformen umfasst das Trägersubstrat einen Halbleiterwafer. In be-

vorzugten Ausführungsformen enthält der Halbleiterwafer ein Material ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Silicium, Galliumarsenid, Siliciumcarbid, Siliciumgermanium, Germanium, Lithiumniobat ($LiNbO_3$), Bariumtitanat ($BaTiO_3$), und Kombinationen davon. In besonders bevorzugten Ausführungsformen umfasst der Halbleiterwafer einen Wafer, der von einem Einkristall-Siliciumwafer abgeschnitten wurden, der von einem Einkristall-Barren abgeschnitten wurde, welcher nach konventionellen Czochralski-Kristallzüchtungsverfahren hergestellt wurde. In einigen bevorzugten Ausführungsformen umfasst das Trägersubstrat einen Siliciumwafer mit einer Oxidschicht auf einer Oberfläche. In einigen bevorzugten Ausführungsformen haben die Frontoberfläche des Donorsubstrats und die Frontoberfläche des Trägersubstrats im Wesentlichen identische Dimensionen. Das Trägersubstrat kann auch ein Material sein, das einen wesentlich anderen thermischen Expansionskoeffizienten als Silicium hat. Zum Beispiel kann das Trägersubstrat ein Saphirwafer oder ein Quarzwafer sein. Der Trägerwafer, z.B. Silicium, Saphir oder Quarz, kann einem Oxidationsprozess und einer Sauerstoffplasmaaktivierung unterzogen werden. Anders gesagt können beide Frontoberflächen, diejenige des Donorwafers und diejenige des Trägerwafers, ähnlichen Vorbehandlungen unterzogen werden, und sie können beide aktivierte oxidierte Frontoberflächen enthalten.

[0031] Die hydrophile Frontoberflächenschicht des Donorsubstrats wird als nächstes in engen Kontakt zu einer hydrophilen Oberfläche, z.B. zur Frontoberfläche, eines Trägersubstrats gebracht, um so eine Verbundstruktur zu bilden. Da die mechanische Bindung relativ schwach ist, wird die Verbundstruktur weiter ausgehärtet, um die Bindung zwischen dem Donorwafer und dem Trägerwafer zu verfestigen. Vorteilhafterweise nutzt das Verfahren gemäß der vorliegenden Erfindung eine thermische Aushärtung zur Erzeugung der Spaltebene, bevor das Donorsubstrat und das Trägersubstrat miteinander verbunden werden. Das ermöglicht wesentlich mildere Bedingungen während der thermischen Aushärtung der Verbundstruktur. Diese milderen Bedingungen bezüglich Temperatur und Dauer erlauben die Bildung von Verbundstrukturen mit wesentlich weniger Rissen und anderen Defekten, speziell wenn eine Donorstruktur und eine Trägerstruktur mit wesentlich unterschiedlichen thermischen Expansionskoeffizienten miteinander verbunden werden, wie beispielsweise bei der Verbindung von Siliciumwafern mit Saphir- oder Quarzträgern. Die Verbundstruktur kann bei einer Temperatur zwischen etwa 150°C und etwa 350°C, wie beispielsweise zwischen etwa 150°C und etwa 300°C, bevorzugt bei einer Temperatur von etwa 225°C ausgehärtet werden. Das thermische Aushärten kann eine Dauer zwischen etwa 30 Minuten Stunden und etwa 5 Stunden haben, bevorzugt von etwa 1 Stunde.

[0032] Nach dem thermischen Aushärten ist die Verbindung zwischen dem Donorsubstrat und dem Trägersubstrat stark genug, um einen Schichttransfer durch Spaltung der Verbundstruktur an der Spaltebene einzuleiten. Die Spaltung kann gemäß in der Fachwelt bekannter Techniken erfolgen. In einigen Ausführungsformen kann der Verbundwafer in einer konventionellen Spaltungsstation platziert sein, fixiert durch stationäre Saugnäpfe auf einer Seite und fixiert durch zusätzliche Saugnäpfe an einem Gelenkarm auf der anderen Seite. Ein Riss wird nahe dem Befestigungsort der Saugnäpfe initiiert, und der bewegliche Arm dreht sich um das Gelenk, was den Wafer auseinanderspaltet.

[0033] Die beschriebene Technik kann für eine Reihe von Schichttransfer-Anwendungen verwendet werden, in denen ein Schichttransfer bei einer niedrigen Temperatur erforderlich ist. Diese umfassen den Schichttransfer von Siliciumschichten auf unähnliche Substrate wie beispielsweise Saphir, kristallines oder glasförmiges Quarz, oder andere isolierende und halbleitende Substrate. Die Technik kann auch verwendet werden, um Schichttransfer von anderen halbleitenden Deckschichten auf ein Substrat zu ermöglichen, falls der Halbleiter ionisch gespalten werden kann. Einige Beispiele könnten GaAs, SiC, Si-Ge, oder Ge sein. Die für diese Anwendungen zu verwendenden Hitzebehandlungstemperaturen und Behandlungsdauern und Dosisbereiche sind derzeit nicht bekannt.

[0034] Die folgenden nichtbeschränkenden Beispiele werden angeführt, um die Erfindung weiter zu veranschaulichen.

BEISPIEL

[0035] Die Start-Donorwafer und -Trägerwafer waren P-Wafer mit 200 mm Durchmesser, die Bor-dotiert waren für eine Resistivität zwischen 9-18 Ohm-cm. Eine 60 nm dicke Oxidschicht wurde auf den Donorwafern mit einem Feuchtoxidationsprozess wachsen gelassen.

[0036] Der oxidierte Siliciumdonorwafer wurde mit Heliumionen implantiert bis zu einer Gesamtdosis von etwa $1,3 \times 10^{16}$ Atomen/cm² unter Verwendung einer Energie von etwa 27 keV. Das Maximum des He-Tiefenprofils wurde berechnet auf eine Lage von ungefähr 256 nm unterhalb der oxidierten Donoroberfläche.

[0037] Der Helium-implantierte Siliciumwafer wurde dann mit Wasserstoffionen implantiert bis zu einer Gesamtdosis von etwa $1,3 \times 10^{16}$ Atomen/cm² und mit einer Energie von etwa 37 keV. Das Maximum des H-Profiles wurde berechnet auf eine Lage von ungefähr 256 nm unterhalb der oxidierten Donoroberfläche.

[0038] Der Donorwafer mit der Helium- und Wasserstoffimplantatschicht wurde für etwa 8 Stunden bei 300°C ausgehärtet.

[0039] Der Donorwafer mit der darin befindlichen Spaltebene wurde in einer Piranha-Reinigung gereinigt, gefolgt von SC1/SC2, Spülung und Trocknen.

[0040] Der gereinigte Donorwafer wurde dann aktiviert durch Sauerstoffplasma-Oberflächenaktivierung in einem EV Group-Plasmaaktivierungs-System, als Vorbereitung für die Verbindung mit einem zweiten Substrat.

[0041] Der aktivierte Donorwafer wird dann mit einem zweiten Si-Substrat verbunden und für etwa 1 Std bei 225°C ausgehärtet.

[0042] Daran anschließend wird das Verbundpaar mechanisch gespalten und somit wurde ein Schichttransfer erreicht.

[0043] In Anbetracht des Obigen kann man erkennen, dass die verschiedenen Ziele der Erfindung erreicht werden. Da verschiedene Änderungen in dem oben beschriebenen Verfahren vorgenommen werden könnten, ohne aus dem Geltungsbereich der Erfindung zu gelangen, sollen alle in der obigen Beschreibung enthaltenen Gegenstände als illustrativ verstanden werden, und nicht in einem limitierenden Sinne. Zusätzlich sollen bei der Vorstellung von Elementen der vorliegenden Erfindung oder von bevorzugten Ausführungsform(en) davon die Artikel „ein“, „eine“, „der/die/das“ und „dieser/diese/dieses“ bedeuten, dass es eines oder mehrere der Elemente sind. Die Begriffe „umfassend“, „enthaltend“ und „mit“ sollen einschließend sein und bedeuten, dass zusätzliche Elemente vorhanden sein können, die sich von den aufgezählten Elementen unterscheiden.

Patentansprüche

1. Ein Verfahren zur Herstellung einer Verbundstruktur, das Verfahren umfassend der Reihenfolge nach die folgenden Schritte:

(a) Implantieren von Heliumionen durch eine Frontoberfläche eines monokristallinen Siliciumsubstrats, wobei das monokristalline Siliciumsubstrat zwei hauptsächlich parallele Hauptflächen, von denen die eine eine Frontoberfläche des monokristallinen Siliciumsubstrats ist, und von denen die andere eine Rückseitenoberfläche des monokristallinen Siliciumsubstrats ist, eine Umfangskante, welche die Front- und Rückseitenoberflächen verbindet, und eine Mittelebene zwischen der Front- und Rückseitenoberfläche umfasst, und wobei die Heliumionen in eine Durchschnittstiefe D_1 von 0,02 Mikrometer bis 1 Mikrometer implantiert werden, gemessen ausgehend von der Frontoberfläche in Richtung der Mittelebene;

(b) Implantieren von Wasserstoffionen durch die Frontoberfläche des monokristallinen Siliciumsubstrats in eine Durchschnittstiefe D_2 von 0,02 Mikrometer bis 1 Mikrometer, gemessen ausgehend von der Frontoberfläche in Richtung der Mittelebene, und wobei die Durchschnittstiefe D_1 und die Durchschnittstiefe D_2 innerhalb von 100 Nanometern liegen;

(c) Aushärten des monokristallinen Siliciumsubstrats bei einer Temperatur von 200°C bis 350°C für eine Dauer von 2 Stunden bis 10 Stunden um eine Spaltebene im monokristallinen Siliciumsubstrat zu erzeugen, wobei die Spaltebene eine Durchschnittstiefe gleich D_1 , D_2 , oder einem Wert zwischen D_1 und D_2 hat;

(d) Verbinden der Frontoberfläche des monokristallinen Siliciumsubstrats mit der darin befindlichen Spaltebene mit einer Oberfläche eines Trägersubstrats, so dass die Verbundstruktur entsteht, wobei das Trägersubstrat ein Halbleiterwafer ist, der ein Material ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Silicium, Saphir, Quarz, Galliumarsenid, Siliciumcarbid, Siliciumgermanium, und Germanium enthält; und

(e) Aushärten der Verbundstruktur bei einer Temperatur zwischen 150°C und 350°C für eine Dauer zwischen 30 Minuten und 5 Stunden.

ne durch Sauerstoffplasma-Oberflächenaktivierung, wobei diese Aktivierung vor dem Herstellen der Verbindung geschieht.

11. Das Verfahren gemäß Anspruch 1, des Weiteren umfassend eine Spaltung der Verbundstruktur entlang der Spaltebene, so dass eine Mehrschichtstruktur entsteht.

12. Das Verfahren gemäß Anspruch 1, wobei:

in Schritt (a) die Heliumionen durch die Frontoberfläche des monokristallinen Siliciumsubstrats mit einer Gesamtdosis an implantierten Heliumionen im Bereich von $0,5 \times 10^{16}$ Heliumionen/cm² bis 2×10^{16} Heliumionen/cm² implantiert werden; und

in Schritt (b) die Wasserstoffionen durch die Frontoberfläche des monokristallinen Siliciumsubstrats mit einer Gesamtdosis an implantierten Wasserstoffionen im Bereich von $0,5 \times 10^{16}$ Wasserstoffionen/cm² bis 3×10^{16} Wasserstoffionen/cm² implantiert werden.

Es folgen keine Zeichnungen

2. Das Verfahren gemäß Anspruch 1, wobei die Schritte (a) und (b) in dieser Reihenfolge und vor Schritt (c) durchgeführt werden.

3. Das Verfahren gemäß Anspruch 1, wobei die Schritte (a) und (b) gleichzeitig und vor Schritt (c) durchgeführt werden.

4. Das Verfahren gemäß Anspruch 1, wobei das monokristalline Siliciumsubstrat einen monokristallinen Siliciumwafer umfasst, welcher von einem Einkristall-Siliciumbarren, gezüchtet mit dem Czochralski-Verfahren, abgeschnitten wurde.

5. Das Verfahren gemäß Anspruch 1, wobei das Trägersubstrat ein Siliciumwafer ist.

6. Das Verfahren gemäß Anspruch 5, wobei der Siliciumwafer eine SiO₂-Oberflächenschicht enthält.

7. Das Verfahren gemäß Anspruch 1, wobei das Trägersubstrat ein Saphirwafer ist.

8. Das Verfahren gemäß Anspruch 1, wobei das Trägersubstrat ein Quarzwafer ist.

9. Das Verfahren gemäß Anspruch 1, wobei die Frontoberfläche des monokristallinen Siliciumsubstrats vor der Durchführung der Schritte (a) und (b) eine Oxidschicht enthält.

10. Das Verfahren gemäß Anspruch 1, des Weiteren umfassend die Aktivierung des monokristallinen Siliciumsubstrats mit der darin enthaltenen Spaltebe-