



(12) Wirtschaftspatent

Erteilt gemäß § 17 Absatz 1 Patentgesetz

(19) DD (11) 216 141 A1

3(51) H 01 L 31/10

H 01 L 21/265

AMT FÜR ERFINDUNGS- UND PATENTWESEN

In der vom Anmelder eingereichten Fassung veröffentlicht

(21) WP H 01 L / 248 360 4

(22) 01.03.83

(44) 28.11.84

(71) Kombinat VEB Carl Zeiss JENA, 6900 Jena, Carl-Zeiss-Straße 1, DD

(72) Sieber, Nina, Dipl.-Ing.; Lorenz, Ulrich, Dipl.-Phys.; Wenzel, Helmut, Dipl.-Phys.; Waitschies, Reinhardt, Dipl.-Phys., DD

(54) UV-strahlungsempfindliche Fotodiode

(57) Bei einer UV-strahlungsempfindlichen Fotodiode sollen die Diodeneigenschaften für den UV-Bereich verbessert werden. Aufgabengemäß war eine technologisch gut herstellbare Diode hoher Empfindlichkeit, hoher Dynamik und kurzer Impulsanstiegs- und -abfallzeiten im Spektralbereich $200 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1\,000 \text{ nm}$ zu schaffen, die einen möglichst geringen rauscharmen Dunkelstrom-unterhalb einer möglichst hohen Durchbruchspannung aufweist. Erfindungsgemäß werden in der Isolatordeckschicht geringer Stärke in einem bestimmten Bereich definiert durch Ionenimplantation Ladungsträger erzeugt, so daß die an die niederohmige Isolatordeckschicht angrenzende Inversionsschicht eine vernachlässigbare geringe Anzahl an direkt implantierten oder rückstoßimplantierten Ionen und Atomen besitzt. Figur

Titel der Erfindung

UV-strahlungsempfindliche Fotodiode

Anwendungsgebiet der Erfindung

Die Erfindung betrifft eine UV-strahlungsempfindliche Fotodiode aus p-Silizium mit einer positiven Ladung enthaltenden Isolatordeckschicht, die im p-Silizium eine n-Inversionsschicht bewirkt und ein Verfahren zu ihrer Herstellung.

Charakteristik der bekannten technischen Lösungen

Bekannt ist eine Inversionsschicht-Fotodiode (G.G. Slaten, E.H. Snow, US-Patent 3,601,668; H 01 L 15/00), die durch Aufbringen einer Oxidschicht, hergestellt wird. Weiterhin ist bekannt, daß bei der thermischen Oxidation ($T \approx 800^\circ\text{C}$) von p-Silizium unter bestimmten Bedingungen eine positive Ladung in der aufwachsenden SiO_2 -Schicht entsteht, die zur Herstellung von Inversionsschicht-Fotodioden genutzt werden kann (T.E. Hansen, Physica Scripta, 18 (1978) S. 471). Eigene Versuche zeigten, daß die bei der

thermischen Oxidation im SiO_2 entstehende positive Ladung und der davon abhängige Inversionsschicht-Flächenwiderstand R_D der UV-Diode durch Restverunreinigungen beeinflusst wird und somit schlecht reproduzierbar ist. Es wurde ein Verfahren gefunden, bei dem ein hoher Inversionsschicht-Flächenwiderstand $R_D \approx 1 \text{ M}$ (niedrige Oxidladungsdichte) reproduzierbar erreicht werden kann. Damit wurden eine hohe Durchbruchspannung ($U_D \approx 400 \text{ V}$), aber auch ein relativ hoher Dunkelstrom ($I_D \approx 20 \text{ nA}$, bei einer Diodenfläche von $A = 1 \text{ cm}^2$) erzielt. Als Nachteile erweisen sich hierbei eine geringe Strahlungsbelastbarkeit (Abweichungen von der Proportionalität des Fotostromes zur eingestrahlten Leistung ab einer bestimmten Strahlungsleistungsdichte), eine generell etwas verringerte spektrale Empfindlichkeit im Bereich $200 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1000 \text{ nm}$ und eine größere Impulsanstiegs- und -abfallzeit. Um eine hohe positive Isolatorladungsdichte (kleiner Inversionsschicht-Flächenwiderstand) zu erzielen, ist bereits ein weiteres Verfahren zur Herstellung von Solarzellen bekannt (R. Hezel, BRD-OS 28 46 096, H 01 L 31/04). Hierbei wird auf einer dünnen Siliziumoxidschicht (auf Si) eine zweite andersartige Isolatorschicht abgeschieden, wobei die an der Grenzfläche auftretenden Strukturdefekte die feste positive Isolatorladung bewirken. Dieses Verfahren erscheint etwas schwierig in bezug auf Reproduzierbarkeit einer definierten Isolatorladungsdichte. Eigene Versuche zeigten, daß hierbei nur ein minimaler Inversionsschicht-Flächenwiderstand von etwa $6 \text{ k}\Omega$ erreichbar ist. Weiterhin ist bekannt, daß durch Ionenimplantation in die Isolatorschicht bis in die Nähe der Übergangsschicht Isolator-Halbleiter in Abhängigkeit von der Implantationsenergie und der Ionendosis (nach geeigneter Temperung der Probe) Isolatorladungsdichten definiert und reproduzierbar

einstellbar sind. (G. Sixt, A. Goetzberger, Appl. Phys. Lett., Vol. 19, No 11 (1971) S. 478; E. Hensel, N. Sieber, 9. Arbeitstagung "Physik der Halbleiteroberfläche", Binz 1978, S. 65).

Das Problem besteht hierbei in der Geringhaltung bzw. Verringerung von implantationsbedingten Strukturdefekten in der Nähe der Grenzfläche Isolator-Halbleiter bzw. im Halbleiter selbst, die eine stärkere Rekombination von grenzflächennah generierten Elektronen-Loch-Paaren bewirken und somit die UV-Empfindlichkeit von Fotodioden herabsetzen.

Ziel der Erfindung

Ziel der Erfindung ist es, die genannten Nachteile zu vermeiden bzw. zu vermindern und die Diodeneigenschaften für den UV-Bereich zu verbessern.

Darlegung des Wesens der Erfindung

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine technologisch gut und reproduzierbar herstellbare UV-strahlungsempfindliche Fotodiode mit einer möglichst hohen Empfindlichkeit im Spektralbereich $200 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1000 \text{ nm}$ zu schaffen, die einen weiten Proportionalitätsbereich zwischen eingestrahlter Lichtleistung und abgeführten Fotostrom, kurze Impulsanstiegs- und -abfallzeiten und einen möglichst geringen rauscharmen Dunkelstrom unterhalb einer möglichst hohen Durchbruchspannung aufweist.

Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe bei einer UV-strahlungsempfindlichen Fotodiode aus p-Silizium mit einer positiven Ladung enthaltenden Isolatordeckschicht, die im p-Silizium eine n-Inversionsschicht bewirkt, dadurch gelöst, daß die Isolatordeckschicht geringer Stärke, vorzugsweise mit einer Stärke von $\leq 50 \text{ nm}$, mindestens in einem Teil ihrer aktiven Fläche durch

Ionenimplantation hervorgerufene Ladungsträger im wesentlichen in einem Bereich der Implantations-Ioneneindringtiefe bis zu $2/3$ der Isolatordeckschichtstärke, vorzugsweise im Bereich von $1/3$ bis $1/2$ der Isolatordeckschichtstärke enthält, und daß die Isolatordeckschicht angrenzende n-Inversionsschicht eine vernachlässigbare geringe Anzahl an direkt implantierten Ionen und Atomen sowie an rückstoßimplantierten Ionen und Atomen der Isolatordeckschicht enthält.

Für die Herstellung der Fotodiode ist es vorteilhaft, wenn die Isolatordeckschicht mit einer Anzahl von $< 10^{15}$ Ionen pro cm^2 , vorzugsweise 10^{14} Ionen pro cm^2 , von Elementen der 5. Hauptgruppe des Periodensystems der Elemente, insbesondere Phosphor, Arsen oder Antimon, implantiert wird, und daß die Fotodiode nach der Implantation bei Temperaturen $> 400^\circ\text{C}$, vorzugsweise $\approx 800^\circ\text{C}$ in an sich bekannter Weise getempert wird.

Es ist dabei zweckmäßig, wenn eine Isolatordeckschicht aus SiO_2 mit einer Stärke von ≤ 50 nm mit Phosphorionen der Energie ≤ 20 keV und eine Isolatordeckschicht mit einer Stärke von ≤ 35 nm mit Arsenionen der Energie ≤ 30 keV implantiert werden.

Durch die Erfindung wird gezielt die Isolatordeckschicht, die als Antireflexionsschicht, als Trägerschicht von elektrischen Ladungen und als Passivierungsschicht dient, beeinflußt. Der Inversionsschicht-Flächenwiderstand ist niederohmig, so daß ein großer Fotostrom proportional zur Beleuchtungsstärke bzw. zur eingestrahlten Lichtleistung abgeleitet werden kann und Impulsanstiegs- und -abfallzeiten klein sind.

Mit der definierten Implantation werden gezielt die Ladungsträger in dem genannten Bereich der Isolatordeckschicht verursacht, so daß lediglich ein vernachlässigbarer Ausläufer des Implantationsprofils bis ins Si-Grundmaterial reicht.

Im Bereich der UV-spezifischen mittleren Absorptionstiefe (< 100 nm) der UV-Strahlung im Silizium, sind reproduzierbar herstellbar nur wenige Defekte vorhanden, die als Rekombinationszentren wirken, die Grenzflächenzustandsdichte an der Si-SiO₂-Grenzfläche ist niedrig ($N_{SS} \lesssim 10^{11} \text{V}^{-1} \text{cm}^{-2}$).

Als vorteilhaft erwies sich die Implantation von Phosphor-, Arsen- oder Antimon-Ionen in das System SiO₂ auf Si, wobei die größte positive Oxidladungsdichte pro implantierter Ionenzahl auftrat. Nach der Ionenimplantation erfolgt eine an sich bekannte Temperung, vorteilhaft bei ca. 800°C, um implantationsbedingte, rekombinationswirksame Defekte in Grenzflächennähe im Si auszuheilen. Als besonders vorteilhaft erwies sich die P-Ionenimplantation in dünne SiO₂-Schichten

dSiO₂ $\lesssim 35 \dots 50$ nm mit einer Ionenenergie von $E \lesssim 20 \dots 30$ keV und einer Dosis $D_P \lesssim 1 \cdot 10^{14}$ P-At $\cdot \text{cm}^{-2}$. Bei geringen SiO₂ Schichtdicken und kleinen Ionenimplantationsenergien besitzt das Profil der implantierten Ionenkonzentration im Bereich der Grenzschicht SiO₂-Si eine steile Flanke, woraus ein gutes Verhältnis von festen positiven Oxidladungen zu Grenzflächenzuständen (bzw. rekombinationswirksamen Defekten) resultiert. Die dünnen SiO₂-Schichten lassen sich vorteilhaft durch anodische oder thermische Oxidation von Si kontrollierbar herstellen. Durch Abscheiden einer zweiten (ggf. dickeren) Isolatordeckschicht (z.B. Gesputtertes SiO₂, CVD-Si₃N₄) auf der dünnen implantier-

ten SiO_2 -Schicht können die Eigenschaften der Deckschicht bzw. Reflexionsminderung, Verstärkung der Inversion in p-Si Passivierung der Si-Oberfläche weiter verbessert werden.

Ausführungsbeispiele:

Die Erfindung soll nachstehend anhand eines in der Zeichnung dargestellten Ausführungsbeispieles näher erläutert werden.

Die Zeichnung zeigt eine Inversionsschicht-Fotodiode (nachfolgend als IS-Fotodiode bezeichnet) im Schnitt bei Implantation von Ionen 1 in eine SiO_2 -Schicht 2 dar. Eine Implantationsmaske 3, die z.B. aus Fotolack (Resist), aus einer dickeren SiO_2 -Schicht oder aus einer Metallschicht besteht, bewirkt, daß beim Beschuß mit Ionen 1, diese nur in einen Bereich innerhalb eines n^+ -Kontaktrahmens 4 in die dünne SiO_2 -Schicht 2 eingringen. Der n^+ -Kontaktrahmen 4 kontaktiert eine n-Inversionsschicht 5 durch ein (hier nicht eingezeichnetes) mit einer Al-Schicht versehenes Kontaktfenster nach außen. Ein p^+ -Kontaktrahmen 6 unterbricht die n-Inversionsschicht 5 und begrenzt damit die empfindliche Fläche der Inversionsschicht-Fotodiode. Der p^+ -Kontaktrahmen 6 ist über ein p-Silizium-Substrat 7 relativ niederohmig mit einem p^+ -Rückkontakt 8 verbunden, der über eine Al-Schicht 9 nach außen kontaktiert ist. Die p^+ - und n^+ -Kontaktrahmen 6 und 4 und der p^+ -Rückkontakt 8 sind z.B. durch Implantation von B- bzw. P-Ionen in das p-Silizium-Substrat 7, das nachfolgend getempert bzw. thermisch oxidiert wird (z.B. bei $T = 800^\circ\text{C}$), hergestellt. Bei der thermischen Oxidation des Substrates aus p-Silizium bildet sich die SiO_2 -Schicht 2, die positive

Ladungen enthält. Diese positiven Ladungen bewirken im entsprechenden hochohmigen p-Silizium-Substrat 7 ($\rho_p = 200 \text{ Ohmcm}$) die Ausbildung der n-Inversionsschicht 5.

Bei ausreichender Sauberkeit beim Oxidationsprozeß erhält man n-Inversionsschichten 5 mit einem Flächenwiderstand $R_D \gtrsim 100 \text{ kOhm}$ (z.T. bis $R_D > 1 \text{ MOhm}$); anderenfalls kann der Flächenwiderstand R_D unreproduzierbar beträchtlich kleiner werden. Mit dem Flächenwiderstand R_D sind auch die Durchbruchsspannung U_D der Inversionsschicht-Fotodiode ab, da die Feldstärke am Übergang zwischen der n-Inversionsschicht 5 (auf der Seite des n^+ -Kontaktrahmens) und dem p^+ -Kontaktrahmen 6 dann bei entsprechend kleineren Spannungen U ihren kritischen Wert erreicht. Das Anlegen einer erhöhten Spannung (z.B. $U = 30 \text{ V}$) ist zur Erreichung optimaler Funktionsparameter unter bestimmten Arbeitsbedingungen der Inversionsschicht-Fotodiode ebenso erforderlich wie ein geringer Inversionsschicht-Flächenwiderstand R_D im Bereich des Hauptteils der empfindlichen Fläche. Die Inversionsschicht-Fotodiode funktioniert wie folgt:

- Die einfallenden Photonen durchdringen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit (dem sog. Transmissionskoeffizienten) die SiO_2 -Schicht 2.
- Im Si-Substrat (p-Si und n-Inversionsschicht) werden sie in Elektronen-Loch-Paare umgesetzt.
- Die Elektronen und Löcher werden im elektrischen Feld getrennt, das von den positiven Ladungen in der SiO_2 -Schicht 2 und von der von außen angelegten Spannung U aufgebaut wird, und das sich sowohl über die n-Inversionsschicht 5 als auch über einen der Zeichnung nicht eingezeichnete p-Verarmungsschicht erstreckt, d.h. Löcher werden aus der n-Inversionsschicht 5

ausgestoßen, Elektronen müssen in die n-Inversionsschicht 5 eindringen, (z.B. auch durch Diffusion in die Feldzone bei Paarerzeugung in größeren Tiefen des P-Silizium-Substrat 7).

- Durch Rekombination können Elektronen-Loch-Paare verlorengehen, die dann nicht zum Fotostrom beitragen.
- Elektronen fließen über die n-Inversionsschicht 5, den n^+ -Kontaktrahmen und eine Al-Schicht nach außen ab, Löcher über das p-Silizium-Substrat 7, den p^+ -Rückkontakt 8 und die Al-Schicht 9.

Die erfindungsgemäße Erzeugung von zusätzlichen festen, positiven Ladungen in dem Bereich der SiO_2 -Schicht 2 innerhalb des n^+ -Kontaktrahmens 4 durch Implantation von Ionen, wirkt sich wie folgt auf die Funktionsweise der Inversionsschicht-Fotodiode aus:

- Die hohe Durchbruchsspannung, U_D und der niedrige Dunkelstrom I_D die von dem unbeeinflussten Bereich zwischen dem n^+ -Kontaktrahmen 4 und dem p^+ -Kontaktrahmen 6 wesentlich bestimmt werden, bleiben erhalten.
- Die Implantation erfolgt mit einer solchen (möglichst hohen) Ionendosis-D bei der noch keine bedeutende Verschlechterung des Transmissionskoeffizienten der SiO_2 -Schicht 2 auftritt,
- und mit einer solchen an die Dicke der SiO_2 -Schicht 2 angepaßten Ionenenergie, daß eine große Dichte von festen positiven Ladungen möglichst nahe an der Grenzfläche SiO_2 -Si erzeugt wird, aber andererseits die Defektdichte an der Grenzfläche und im Si-Substrat so niedrig gehalten wird, daß nach einer Ausheilung bei einer Temperatur $T = 800^\circ\text{C}$ nur eine gegenüber dem Ausgangszustand geringfügige erhöhte Dichte von Rekombinationszentren übrig bleibt (Das ist insbesondere mit einer möglichst

dünnen SiO_2 -Schicht 2 ($d_{\text{SiO}_2} < 50 \text{ nm}$) und einer niedrigen Ionenenergie zu realisieren, so daß das Konzentrationsprofil der implantierten Ionen über die Tiefe einen steilen Abfall an der Grenzfläche SiO_2 -Si aufweist.

- und mit einer solchen Ionenart (Elemente der 5. Hauptgruppe des PSE), daß beim Eindringen eines relativ geringen Anteils der Ionen bei der Implantation und nachfolgenden Temperung in grenzflächennahe Bereiche des Si-Substrats diese die n-Leitfähigkeit der n-Inversionsschicht 5 zusätzlich erhöhen.
- Die Erhöhung der Dichte von festen positiven Ladungen in der SiO_2 -Schicht 2, möglichst nahe an der Grenzfläche SiO_2 -Si wirkt sich dahingehend aus,
- daß die elektrische Feldstärke in dem grenzflächennahen Bereich im Si-Substrat erhöht wird, in dem die UV-Strahlung absorbiert und in Elektronen-Lochpaare umgesetzt wird, was zu einer schnelleren Trennung der Paare führt und damit der Rekombination entgegenwirkt,
- daß die Dicke der n-Inversionsschicht 5 und die Dichte der Elektronen darin anwächst und damit eine schnellere und effektivere Trennung von in größeren Tiefen erzeugten Ladungsträgerpaaren schon ohne Anlegen einer äußeren Spannung U erreicht wird, aber das auch das Anlegen einer höheren Spannung U möglich wird, wodurch sich die Feldzone in noch größere Tiefen ins p-Silizium-Substrat 7 ausdehnt, ohne daß die n-Inversionsschicht 5 wesentlich an Elektronen verarmt: (In der Zone hoher Feldstärke werden die Ladungsträgerpaare bedeutend schneller getrennt und an den Kontakten nach außen abtransportiert, wodurch sich die Impulsanstiegs- und abfallzeit entsprechend verkürzt. Andererseits ver-

längert sich die Impulsanstiegs- und abfallzeit durch Verarmung der n-Inversionsschicht 5 an Elektronen, dadurch daß sich ihr Flächenwiderstand R vergrößert, und dieser zusammen mit der Kapazität C der Inversionsschicht-Fotodiode wie ein integrierendes RC-Glied wirkt).

- daß eine erhöhte einfallende Strahlungsleistungsdichte von der Inversionsschicht-Fotodiode in einen zur Strahlungsleistung annähernd proportionalen Fotostrom umgewandelt werden kann. (Bei zu geringer Dichte von positiven Ladungen in der SiO_2 -Schicht 2 und zu höher Strahlungsleistungsdichte übertreffen die inneren Felder zwischen den erzeugten Elektronen-Loch-Paaren das "äußere" Feld der Inversionsschicht-Fotodiode und schirmen es ab (Plasmaeffekt) wodurch nur eine geringe begrenzte Anzahl von Ladungsträgerpaaren vom Rand des bestrahlten Gebietes getrennt und abtransportiert werden können, während der Großteil rekombiniert.

Erfindungsanspruch

1. UV-strahlungsempfindliche Fotodiode aus p-Silizium mit einer positive Ladungen enthaltenden Isolatordeckschicht, die im p-Silizium eine n-Inversionsschicht bewirkt, gekennzeichnet dadurch, daß die Isolatordeckschicht geringer Stärke, vorzugsweise mit einer Stärke von $\lesssim 50$ nm, mindestens in einem Teil ihrer aktiven Fläche durch Ionenimplantation hervorgerufenen Ladungsträger im wesentlichen in einem Bereich der Implantations-Ioneneindringtiefe bis zu $2/3$ der Isolatordeckschichtstärke, vorzugsweise im Bereich von $1/3$ bis $1/2$ der Isolatordeckschichtstärke enthält, und daß die an die Isolatordeckschicht angrenzende Inversionsschicht eine vernachlässigbare geringe Anzahl an direkt implantierten Ionen und Atomen sowie an rückstoßimplantierten Ionen und Atomen der Isolatordeckschicht enthält.
2. Verfahren zur Herstellung der UV-strahlungsempfindlichen Fotodiode gemäß Punkt 1, bei dem auf ein p-Silizium-Grundelement eine Isolatordeckschicht aufgebracht wird, die eine n-Inversionsschicht bewirkt, gekennzeichnet dadurch, daß die Isolatordeckschicht mit einer Anzahl von $< 10^{15}$ Ionen pro cm^2 , vorzugsweise 10^{14} Ionen pro cm^2 , von Elementen der 5. Hauptgruppe des Periodensystems der Elemente, insbesondere Phosphor, Arsen oder Antimon, implantiert wird, und daß die Fotodiode nach der Implantation bei Temperaturen $> 400^\circ\text{C}$, vorzugsweise $\gtrsim 800^\circ\text{C}$ in an sich bekannter Weise getempert wird.

3. Verfahren gemäß Punkt 2, gekennzeichnet dadurch, daß eine Isolatordeckschicht aus SiO_2 mit einer Stärke von ≤ 50 nm mit Phosphorionen der Energie ≤ 20 keV implantiert wird.
4. Verfahren gemäß Punkt 2, gekennzeichnet dadurch, daß eine Isolatordeckschicht aus SiO_2 mit einer Stärke von ≤ 35 nm mit Arsenionen der Energie ≤ 30 keV implantiert wird.

Hierzu 1 Seite Zeichnungen

