

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
02. Januar 2020 (02.01.2020)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2020/001694 A1**

- (51) Internationale Patentklassifikation:  
H01L 29/15 (2006.01) H01L 29/207 (2006.01)  
H01L 29/20 (2006.01)
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2019/100572
- (22) Internationales Anmeldedatum:  
20. Juni 2019 (20.06.2019)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:  
10 2018 115 222.1  
25. Juni 2018 (25.06.2018) DE
- (71) Anmelder: OTTO-VON-GUERICKE-UNIVERSITÄT  
MAGDEBURG [DE/DE]; Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg (DE).
- (72) Erfinder: STRITTMATTER, André; Bergstrasse, 18a, 14548 Schwielowsee (DE). DADGAR, Armin; Jagowstraße 35, 10555 Berlin (DE).
- (81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY,

BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

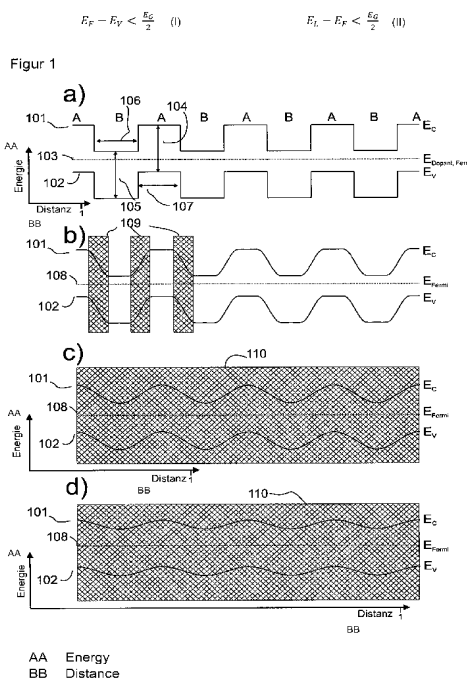
(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

— hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, ein Patent zu beantragen und zu erhalten (Regel 4.17 Ziffer ii)

(54) Title: SEMICONDUCTOR LAYER STACK AND METHOD FOR PRODUCING SAME

(54) Bezeichnung: HALBLEITERSCHICHTSTAPEL UND VERFAHREN ZU DESSEN HERSTELLUNG



(57) Abstract: The invention relates to a semiconductor layer stack, to a component made therefrom and to a component module, and to a production method, the semiconductor layer stack being characterized by at least two layers (A, B), which, as individual layers, each have an energetic position of the Fermi level (103) in the semiconductor band gap (104, 105), formula (I) applying to the layer (A) and formula (II) applying to the layer B, with  $E_F$  the energetic position of the Fermi level (103),  $E_V$  the energetic position of a valence band (102),  $E_L$  the energetic position of a conduction band (101) and  $E_L - E_V$  the energy difference of the semiconductor band gap  $E_G$  (104, 105), the thickness (106, 107) of the layers (A, B) being selected in such a way that a continuous space charge region (110) over the layers (A, B) results.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft einen Halbleiterschichtstapel, ein Bauelement hieraus und ein Bauelementemodul, sowie ein Herstellungsverfahren, wobei der Halbleiterschichtstapel, gekennzeichnet ist durch mindestens zwei Schichten (A, B), die als Einzelschichten jeweils eine energetische Lage des Fermi-niveaus (103) in der Halbleiterbandlücke (104, 105) aufweisen, für die Schicht (A) Formula (I) gilt und für die Schicht (B) Formula (II) gilt, mit  $E_F$  der energetischen Lage des Fermi-niveaus (103),  $E_V$  der energetischen Lage eines Valenzbands (102),  $E_L$  der energetischen Lage eines Leitungsbands (101) und  $E_L - E_V$  der Energiedifferenz der Halbleiterbandlücke  $E_G$  (104, 105), wobei die Dicke (106, 107) der Schichten (A, B) so gewählt ist, dass sich ein zusammenhängender Raumladungszonenbereich (110) über die Schichten (A, B) ergibt.

WO 2020/001694 A1

**Veröffentlicht:**

- *mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)*
- *vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eingehen (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe h)*

## Halbleiterschichtstapel und Verfahren zu dessen Herstellung

Die Erfindung betrifft einen Halbleiterschichtstapel und ein Verfahren zu dessen  
5 Herstellung.

Isolierende Halbleiterschichten sind für die elektrische Isolation und ein geringe  
Hochfrequenzdämpfung von Halbleiterbauelementstrukturen unersetzlich. Dabei  
wird meist eine sogenannte tiefe Störstelle, d. h. eine bei Betriebstemperatur nur  
10 zu einem geringen Grad, d. h.  $\ll 50\%$  ionisierte Störstelle, eingesetzt. Liegt intrin-  
sisch oder durch Verunreinigungen eine Elektroneneigenleitung des Halbleiters  
vor, wird meist mit einem tiefen Akzeptor dotiert und umgekehrt, bei einer Lö-  
chereigenleitung, mit einem tiefen Donator. Da entsprechend im ersten Fall eine  
Elektroneninjektion in die isolierende Schicht gut blockiert wird und im zweiten  
15 eine Löcherinjektion, wird durch eine kombinierte gleichzeitige Dotierung von tie-  
fen Akzeptoren und Donatoren wie z. B. dem tiefen Akzeptor Fe und dem tiefen  
Donator Ti im InP das Isolationsverhalten verbessert [T. Wolf, T. Zinke, A. Krost,  
H. Scheffler, H. Ullrich, P. Harde und D. Bimberg, J. Appl. Phys. **75**, 3870 (1994)].  
Typischerweise wird jedoch nur mit einem Dotanden dotiert, da dies in den meis-  
20 ten Fällen ausreichend für die Isolationswirkung und auch prozesstechnisch einfa-  
cher zu beherrschen ist. Idealerweise liegt eine tiefe Störstelle nahe der Mitte der  
Energienlücke des Halbleiters und in einer Konzentration vor, dass sie alle freien  
Ladungsträger einfangen kann und damit das Fermi-niveau an der energetischen  
Position der Störstelle, auch unter Ladungsträgerinjektion, zu liegen kommt bzw.  
25 gepinnt wird. Im Idealfall entspricht dann die freie Ladungsträgerkonzentration der  
Elektronen  $n$  und Löcher  $p$  der intrinsischen Ladungsträgerkonzentration  $n_i$ , also  
 $n = p = n_i$ .

Bei vielen Halbleitern, auch denen mit großer Energienlücke wie den Gruppe-III-Nit-  
30 riden gibt es zwar prinzipiell viele Dotanden, die tiefe Störstellen ausbilden und  
hochohmiges Material ermöglichen, aber deren Lage ist häufig nicht nahe der  
Mitte der Halbleiterbandlücke. Daher ist auch bei ausreichender Konzentration  $N$   
der kompensierenden tiefen Störstelle  $N > n, p$ , also einer Konzentration oberhalb  
der ohne Kompensator vorhandenen Elektronen- bzw. Löcherkonzentration  $n$  bzw.  
35  $p$ , trotz daran gepinntem Fermi-niveau, noch eine Restleitfähigkeit vorhanden und  
 $n$  bzw.  $p$  liegen weit oberhalb der intrinsischen Ladungsträgerkonzentration  $n_i$ .

Selbst bei Ladungsträgerkonzentrationen unterhalb von  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$  ist dies in manchen Halbleitern als hoch anzusehen, da z. B. bei Halbleitern wie GaN sehr hohe Durchbruchfeldstärken von über 3 MV/cm möglich sind und sich bei hohen angelegten Spannungen bzw. Feldstärken geringe Leckströme nachteilig bemerkbar machen. Dies unter anderem weil die Leistung, die lokal bei hohen Spannungen auch bei geringen Leckströmen umgesetzt wird, zu einer Erwärmung und schließlich thermisch bedingtem Durchbruch führen kann. Daher sind möglichst niedrige Restleitfähigkeiten bzw. Ladungsträgerkonzentrationen anzustreben, die der intrinsischen Ladungsträgerkonzentration möglichst nahe kommen. In GaN liegt zum Beispiel der Kohlenstoffakzeptor ca. 0,9 eV oberhalb des Valenzbands während der alternativ einsetzbare Eisenakzeptor ca. 0,6 eV unterhalb des Leitungsbands liegt. Bei einer Bandlücke des GaN von ca. 3,4 eV bei Raumtemperatur liegt die ideale Position einer tiefen Störstelle jedoch bei ca. 1,7 eV. Daher liegt für GaN:C eine freie Löcherkonzentration von ca.  $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$  und für GaN:Fe eine freie Elektronenkonzentration von ca.  $3 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$  vor, deutlich oberhalb der intrinsischen Ladungsträgerkonzentration von ca.  $10^{-9} \text{ cm}^{-3}$ . Demzufolge liegt der Schichtwiderstand bei Verwendung dieser Dotanden um über 10 Größenordnungen unter dem theoretisch erzielbaren Wert, den ein idealer Dotand mit einer energetischen Lage nahe der Mitte der Bandlücke erzielen könnte. Da solch ein Dotand z. B. in GaN bislang nicht bekannt ist, bzw. nicht in geeigneter Form für die Schichtherstellung zur Verfügung steht, sind diese Schichten in ihrer Leistungsfähigkeit beschränkt und limitieren das Einsatzgebiet der daraus hergestellten Bauelemente.

Es gilt nun eine verbesserte Schichtisolation zu erzielen. Diese Aufgabe wird mit einem Halbleiterschichtstapel nach Anspruch 1, einem Bauelementemodul nach Anspruch 9 und Verfahren nach Anspruch 10.

Vorgeschlagen wird ein Halbleiterschichtstapel, gekennzeichnet durch mindestens zwei Schichten (A, B), die als Einzelschichten jeweils eine energetische Lage des Fermi-niveaus (103) in der Halbleiterbandlücke (104, 105) aufweisen, für die Schicht (A)  $E_F - E_V < \frac{E_G}{2}$  gilt und für die Schicht (B)  $E_L - E_F < \frac{E_G}{2}$  gilt, mit  $E_F$  der energetischen Lage des Fermi-niveaus (103),  $E_V$  der energetischen Lage eines Valenzbands (102),  $E_L$  der energetischen Lage eines Leitungsbands (101) und  $E_L - E_V$  der Energiedifferenz der Halbleiterbandlücke  $E_G$  (104, 105), wobei die Dicke (106, 107) der Schichten (A, B) so gewählt ist, dass sich ein zusammenhängen-

der Raumladungszonenbereich (110) über die Schichten (A, B) ergibt.. Dabei können die Schichten direkt aufeinanderfolgen oder auch durch andere Schichten getrennt sein.

- 5 Erfindungsgemäß wird das Problem der Positionierung des Fermi-niveaus nahe der Mitte der Energielücke des Halbleiters gelöst.

Ein zusammenhängender Raumladungszonenbereich ist dann erzielt wenn im gesamten Bereich ein elektrisches Feld abfällt bzw. sich ununterbrochen Abschnitte mit unterschiedlichem elektrischen Potentialverlauf aneinander anschließen. Die Breite einer solchen Raumladungszone ist zwischen zwei Schichten vor allen Dingen davon abhängig wie hoch sie dotiert sind, also wie viele ionisierbare Akzeptoren und Donatoren sie enthalten, dem eingebauten Potentialunterschied  $\Psi_{bi}$ , entsprechend dem Unterschied der Fermi-niveaus in den Einzelschichten, und vom Wert der Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_s$ . Diese Breite lässt sich berechnen. Eine Abschätzung der Raumladungszonenbreite im p-Gebiet  $W_p$  und im n-Gebiet  $W_n$  für einen p-n Übergang mit einer Konzentration an flachen Akzeptoren  $N_A$  und flachen Donatoren  $N_D$  ergibt sich mit  $W_p + W_n = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_s}{q} \left( \frac{N_A + N_D}{N_A \cdot N_D} \right) \Psi_{bi}}$  mit q der Elementarladung.

20 Für tiefe Störstellen und mehrere Dotanden bzw. Defekte, die u. a. verantwortlich für die Restleitfähigkeit sind ist die Berechnung etwas komplexer. Grundsätzlich kann aber aus dem Unterschied der Fermi-niveaulagen und der Konzentration an ionisierten Akzeptoren und Donatoren in der Raumladungszone, welcher sich aus der energetischen Lage selbiger abschätzen lässt, der Wert der Raumladungszonenbreite gut abgeschätzt werden. Angestrebt werden dabei Werte die weit über der Schichtdicke der Einzelschichten liegen um dann im Mittel eine Fermi-niveauposition zwischen der der Ausgangsdotanden zu erzielen. Die Dotanden können, je nach Leitfähigkeit des Ausgangsmaterials, Akzeptoren oder Donatoren sein. Alternativ kann man bei undotiert n-leitendem Material aber auch einen tiefen Akzeptor in einer ersten Schicht in einer Konzentration oberhalb der Elektronenkonzentration dotieren und einen Akzeptor und in einer höheren Konzentration einen tiefen Donator in der zweiten Schicht.

Jede Schicht für sich alleine betrachtet ist dann zwar an Ladungsträgern verarmt, jedoch mit Positionen des Fermi-niveaus nahe der tiefen Akzeptoren bzw. Donatoren, die in den seltensten Fällen nahe der Mitte der Bandlücke ist und somit für die Einzelschichten eine relativ hohe Restleitfähigkeit verbleibt.

5 Durch das abwechselnde Aufwachsen solcher Schichten entsteht jedoch ein Raumladungszonenbereich der eine Fermi-niveauposition zwischen der einzelnen Störstellenniveaus und damit in der Gesamtschicht eine niedrigere Konzentration an Ladungsträgern ermöglicht.

10 Prinzipiell kann der Einbau von Störstellen und somit die Lage des Fermi-niveaus durch die Herstellungsbedingungen in einem begrenztem Rahmen gesteuert werden. Für eine gezielte Dotierung ideal ist es Dotanden zu verwenden, die während des Wachstums entweder aus den Ausgangsstoffen (intrinsisch) oder über eine spezielle Quelle (extrinsisch) zugeführt werden.

15 Eine besonders vorteilhafte Ausführung ist eine extrinsische oder intrinsische Dotierung resultierend in mindestens zwei Störstellenniveaus, die jeweils eine energetische Lage aufweisen für die in einer Schicht (A)  $E_F - E_V < \frac{E_G}{2}$  gilt und einer anderen Schicht (B)  $E_L - E_F < \frac{E_G}{2}$  gilt in einer Konzentration, dass das Fermi-niveau an solchen unendlich dicken Einzelschichten dieselbe energetische Lage wie die  
20 Störstellenniveaus mit einer Toleranz von  $\pm 50$  meV einnimmt, wobei die Dicken der Schichten im Halbleiterschichtstapel so gewählt sind, dass sich ein zusammenhängender Raumladungszonenbereich (110) über den Gesamtschichtstapel ausbildet.

25 Vorteilhaft ist es insbesondere nicht nur zwei Schichten aufeinander zu wachsen sondern diese alternierend abzuwechseln, wobei auch weitere Schichten mit anderen Dotanden bzw. Leitfähigkeiten in den Schichtstapel integriert werden können so lange sich über den gesamten Stapel ein Raumladungszonenbereich erstreckt. Typischerweise ist ein Raumladungszonenbereich auch bei Verwendung  
30 von nur einer als Kompensator dienenden tiefen Störstelle innerhalb einer Bauelementstruktur vorhanden. Dann jedoch liegt das Fermi-niveau an dessen Energieposition gepinnt welche ungünstig sein kann. Durch die abwechselnden Schichten und der damit wechselnden Fermi-niveauposition, bei Betrachtung der Einzelschichten, bildet sich auch zwischen den einzelnen Schichten eine Potentialfluktuation und damit eine Raumladungszone und ein elektrisches Feld aus. Dies ermöglicht im Mittel die Ladungsträgerkonzentration weiter zu senken und so Werte  
35

näher an  $n_i$  zu erzielen, was einen höheren Schichtwiderstand bedeutet. Dadurch kann wiederum die Konzentration der verwendeten Dotanden abgesenkt werden, was sich positiv auf das Schaltverhalten der darüber liegenden Bauelementschichten auswirken kann.

- 5 Es wird also mit der Dotierung eine effektive Fermienergieposition erzielt, die neben der Fermienergieposition in den Einzelschichten, der Konzentration des Dotanden und von der Dicke der einzelnen Schichten abhängt, wobei man über den Parameter der Dicke die resultierende Position am besten einstellen kann.
- 10 Bevorzugt ist in dem Halbleiterschichtstapel eine Energieposition der durch die Dotierung erzeugten tiefen Störstellenniveaus, für die in der Schicht (A)  $E_F - E_V < \frac{E_G \cdot 0.8}{2}$  gilt und für die in der Schicht (B)  $E_L - E_F < \frac{E_G \cdot 0.8}{2}$  gilt, also eine mittlere Fermienergieposition in einem Bereich unter- bzw. oberhalb des mittleren Bereichs der Bandlückenenergie, wobei dieser mittlere Bereich insgesamt 40 % der Bandlückenenergie beträgt. In vielen Halbleitern liegt dieser Wert mit den zur Verfügung
- 15 stehenden Störstellen als Einzeldotanden oberhalb von 50 %, was zu einer nicht zufriedenstellenden Kompensation führen würde, wie es beim GaN:Fe der Fall ist. Liegt das erzeugte Energieniveau nahe der Bandlückenenergiemitte, also innerhalb des oben definierten 40 % Rahmens wird in der Regel auch mit solch einem
- 20 einzigen Dotanden ein zufriedenstellendes Ergebnis in Bezug auf die Schichtisolation erzielt.

- Das erfindungsgemäße Verfahren kann dies jedoch weiter verbessern und ist daher in Einzelfällen auch dann sinnvoll einzusetzen. Als Dotand und hier speziell als
- 25 intrinsischer Dotand gilt auch die durch Eigendefekte oder unbeabsichtigte Verunreinigungen hervorgerufene Hintergrunddotierung der Schicht. Diese kann in einer Einzelschicht alternierend zu einer bewusst dotierten Schicht eingesetzt werden. Aufgrund der normalerweise leicht schwankenden Hintergrunddotierung von Halbleiterschichten ist es jedoch vorzuziehen immer eine bewusst dotierte Schicht einzusetzen. Ein intrinsischer Dotand kann z. B. Kohlenstoff oder Sauerstoff sein, die
- 30 je nach Herstellungsverfahren aus den Ausgangsstoffen oder Trägergasen stammen können. Von diesen Dotanden lässt sich insbesondere Kohlenstoff aus den Alkylresten der eingesetzten Metallorganika durch geeignete Wahl der Wachstumsparameter reproduzierbar mit der metallorganischen Gasphasenepitaxie
- 35 (MOVPE) einbauen.

Da als limitierende Faktoren auch Defekte und insbesondere Versetzungen der Durchbruchfestigkeit und dem Schichtwiderstand, wie bei dem hier beispielhaft behandeltem GaN, noch eine relativ niedrige Grenze setzen, ist eine ausreichende mittlere Position des Fermienergielevels durch tiefe Störstellen auch in einigem Abstand zur theoretisch günstigsten Position sinnvoll.

Anzustreben ist in dem Halbleiterschichtstapel eine mittlere Fermienergieposition  $E_F$  (108) in einem Energiebereich  $\frac{E_G}{2} - E_G \cdot 0.2 < E_F < \frac{E_G}{2} + E_G \cdot 0.2$  im Raumladungszonenbereich (110) also eine mittlere Fermienergieposition in einem Bereich unter- bzw. oberhalb der mittleren Energie der Bandlücke, welcher jeweils bis zu 20 % der Bandlückenenergie beträgt. Die Energiebandlückenmitte ist der Einfachheit halber als ideale Fermienergieposition eines semiisolierenden Halbleiters mit  $n = p = n_i$ , definiert. Die mittlere Position bedeutet, dass das Fermienergielevel gemittelt über die Dicke des erfindungsgemäßen Puffers in diesem Bereich liegt, also in Bereichen auch darüber bzw. darunter liegen darf, wie es bei einer erfindungsgemäßen abwechselnden Dotierung vorkommen kann. Dass die Fermienergie möglichst immer in diesem Bereich liegt wird idealerweise durch die Wahl einer ausreichend dünnen Schicht, der mit einem Dotanden dotierten Einzelschicht des Schichtstapels, optimiert. Dünn insofern, dass bevorzugt weniger als  $\frac{1}{4}$  der für unendlich ausgedehnte Schichtpaare möglichen Änderung der Valenz- bzw. Leitungsbandenergieänderung durch die Raumladungszone in einem Schichtpaar abfallen sollte.

Grundsätzlich kann auch die simultane Dotierung mit zwei Dotanden in einer Schicht den erfindungsgemäßen Nutzen erbringen, jedoch ist dabei eine hochpräzise Kontrolle der jeweiligen Konzentration nötig um das Fermienergielevel ideal zu platzieren. Handelt es sich jedoch um einzelne abwechselnd dotierte Schichten, so nutzt man hier den Effekt aus, dass sich zwischen den beiden dotierten Bereichen eine Raumladungszone mit leicht gekrümmten Bändern ausbildet und dies nicht sehr empfindlich von den jeweiligen Dotierstoffkonzentrationen abhängt, so lange das Fermienergielevel in den Einzelschichten an den durch die Dotierstoffe induzierten Störstellenniveaus gepinnt ist. In diesem Fall lässt sich der Bandverlauf auch berechnen und reproduzierbar herstellen.

Aufgrund der niedrigen Ladungsträgerkonzentration die bei Kompensation der Überschussladungsträger vorliegt erstreckt sich die Raumladungszone in der Re-



gel über einen Bereich von mehreren Mikrometern und daher ergibt sich ein nahezu flacher Bandverlauf mit einer leichten Modulation der Energie der jeweiligen Bänder in den einzelnen Bereichen wie in Figur 1 d dargestellt bzw. noch geringer wenn die unterschiedlich dotierten Schichten dünn genug gewählt werden.

5

Dabei sind ideale Schichtdicken abhängig von der intrinsischen Hintergrunddotierung, der Art der Störstelle, also ob Akzeptor oder Donator, und der energetischen Lage. Im Einzelfall muss die optimale Dotierung dafür simuliert oder experimentell gefunden werden. Grundsätzlich gilt, dass in einem Halbleiter mit einer n-Typ Hintergrunddotierung die Ladungsträger schon von einem in der oberen Hälfte der Energielücke sitzenden Akzeptors zum Großteil eingefangen werden. Durch einen zweiten Akzeptor in der unteren Hälfte der Bandlücke werden die Ladungsträger, die dann noch im Leitungsband verbleiben, eingefangen. Die sich ergebende Raumladungszone ist dann so breit, dass das Fermi-niveau sich fast im gesamten Schichtstapel nahe am unteren Akzeptor befindet und daher diese Schicht eher dünn sein muss, um das Fermi-niveau nicht zu stark abzusenken und im Mittel eine Position des Fermi-niveaus nahe der Bandlückenmitte zu erzielen, also keine nennenswerte Löcherleitung zu induzieren. Aber auch ohne die optimale Dicke zu wählen ist, wie in Figur 6 gezeigt, eine Verbesserung der Schichtisolation erreichbar, da vermutlich lokal eine starke Verarmung an Ladungsträgern erzielt wird. Zudem ist die Lage des Fermi-niveaus schon ohne angelegte Spannung am Schichtstapel auch davon abhängig, wie die angrenzenden Schichten dotiert sind.

Wählt man zum Beispiel eine niedrige, d. h. im Bereich von ca.  $10^{16}$ - $10^{17}$   $\text{cm}^{-3}$ , aber gezielte n-Dotierung durch einen flachen Donator und will diese mit einem tiefen Akzeptor in der unteren Hälfte der Bandlücke kompensieren, so ist es vorteilhaft mit einer hohen Konzentration des tiefen Akzeptors, deutlich oberhalb der Elektronenkonzentration zu dotieren, dafür aber nur in dünnen Schichten. Daraus resultiert ein vollständig an Elektronen verarmter Halbleiter der nur eine geringe Löcherkonzentration durch die dünnen Schichten mit dem tiefen Akzeptor aufweist, anders als bei einer nur mit dem tiefen Akzeptor dotierten Schicht. Diese dünnen hoch mit dem tiefen Akzeptor dotierten Schichten müssen derart dicht platziert sein, dass die entstehenden Raumladungszonenbereiche überlappen. In diesem Fall ist es auch notwendig jeweils am Beginn und am Ende des beabsichtigten isolierenden Schichtstapels mit dem tiefen Akzeptor zu dotieren um eine vollständige Isolation und keine leitfähigen Randbereiche zu erhalten. Solche Schichten sind vorteilhaft für das Schaltverhalten von Bauelementen, da die

35

Reemission von Ladungsträgern aus tiefen Störstellen bei wechselnder angelegter Spannung durch die verringerte Anzahl an tiefen Störstellen und gleichzeitig geringerer Restleitfähigkeit minimiert wird.

- 5 Die erfindungsgemäße Dotierung in dem Halbleiterschichtstapel ist möglich als Dotierung mit akzeptorartigen oder mit donatorartigen Dotanden aber auch als Dotierung mit akzeptorartigen und donatorartigen Dotanden. Zwar ist die Realisierung nur mit akzeptorartigen oder nur mit donatorartigen Dotanden möglich und zum Teil auch sinnvoll, ideal ist jedoch theoretisch eine Kombination von einem
- 10 Donator und einem Akzeptor, da diese Elektronen und Löcherinjektion besser kompensieren, so wie es vom Fe und Ti Kompensator in InP bekannt ist, wobei diese energetisch sehr nahe der Mitte der Energielücke liegen und daher keine erfindungsgemäße Einstellung des Fermi-niveaus durch die Kombination von zwei Dotanden notwendig ist. Verwendet man Akzeptoren und Donatoren so ist es aufgrund der normalerweise vorliegenden Hintergrunddotierung von Elektronen oder
- 15 Löchern nicht einfach diese in Wechselschichten zu dotieren, da tiefe Donatoren keine Elektronen einfangen bzw. kompensieren und tiefe Akzeptoren keine Löcher. Dies kann man im Fall von z. B. einer n-Typ Hintergrunddotierung lösen indem der Donator mit einem flachen p-Dotanden in einer Konzentration oberhalb
- 20 der Elektronenkonzentration kodotiert wird.

Alternativ verwendet man als Donator einen in der oberen Hälfte der Bandlücke und als Akzeptor einen in der unteren Hälfte der Bandlücke. In GaN ermöglicht letzteres z. B. C als tiefer Akzeptor in einer ersten Schicht und ein tiefer Donator

25 ohne p-Kodotierung in der oberen Hälfte der Bandlücke in einer zweiten Schicht. Sofern sich eine Raumladungszone über den Bereich ausbildet wird die durch den Akzeptor induzierte leichte p-Typ Leitung dann durch den Donator in der zweiten Schicht kompensiert, obwohl beide energetische Positionen weit außerhalb des mittleren Bereichs der Energiebandlücke aufweisen. Ideal umsetzbar ist solch eine

30 Struktur mit einem tiefen Akzeptor in einer Schicht A und einem tiefen Donator in Schicht B. Vorzugsweise werden bei solchen Kombinationen Akzeptoren in der unteren Hälfte der Bandlücke und Donatoren in der oberen Hälfte der Bandlücke eingesetzt.

- 35 Die erfindungsgemäße Struktur bzw. der Halbleiterschichtstapel besteht aus mindestens zwei Schichten also einer Abfolge von mindestens zwei Schichtpaketen, beinhaltend mindestens zwei Schichten (A, B) mit einer Fermi-niveaulage für

9

die als Einzelschicht in Schicht (A)  $E_F - E_V < \frac{E_G}{2}$  gilt und für die als Einzelschicht in Schicht (B)  $E_L - E_F < \frac{E_G}{2}$ , wobei es vorteilhaft ist diese mehrfach abzuwechseln also ABABAB, ABABA oder BABAB zu wachsen und auch Schichtenfolgen wie ABCBA oder ACBADB, etc. möglich sind mit C und D beliebigen Zwischenschichten, die jedoch aufgrund ihrer Dicke und Dotierung nicht die Ausbildung eines zusammenhängenden Raumladungszonenbereichs (110) unterbinden dürfen.

Erfindungsgemäß wird ein Bauelementmodul vorgeschlagen, umfassend mindestens ein Bauelement, welches einen erfindungsgemäßen Halbleiterschichtstapel beinhaltet.

Prinzipiell ist die erfindungsgemäße Struktur auch nur mit flachen Dotanden bzw. kombiniert mit flachen und tiefen Donatoren und/oder Akzeptoren möglich. Also ein tiefer Akzeptor und ein flacher Donator und umgekehrt bzw. nur ein flacher Donator und ein flacher Akzeptor wie in Figur 5 gezeigt. Dabei sind in diesem Fall für eine isolierende Wirkung Mehrfachschichten notwendig, da bei nur einem Paar der Schichten A und B ein p-n Übergang, also eine Diodenstruktur entsteht. Bei tiefer liegendem erfindungsgemäßen Fermi-niveau entsteht zwar prinzipiell auch eine p-n Struktur, jedoch sind die Schichten dann schon so hochohmig, dass der Stromfluss durch sie stark vermindert ist und die Diodenkennlinie nur sehr schwach ausgeprägt wäre.

Werden flache Dotanden eingesetzt sind meist sehr dünne Schichten notwendig um eine zusammenhängende Raumladungszone zu erzielen, da die Ladungsträgerkonzentration dann meist über  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  liegt, auch aus diesem Grund sind mehrere Schichten notwendig um eine ausreichend hohe Isolationswirkung über eine ausreichende Schichtdicke zu erzielen, da die Durchbruchfeldstärke materialbedingt limitiert ist.

Der Ansatz mit flachen Dotanden wird schon in ähnlicher Weise in Halbleiterlaserstrukturen realisiert. Dort wird die durch Ätzen strukturierte Laserdiode mit freigelegtem p-n Übergang mit einer umgekehrten Diodenstruktur also umgekehrten Schichtfolge von p- und n-leitender Schicht im Vergleich zur Laserdiodenstruktur, überwachsen. Dadurch entsteht eine im Laserbetrieb sperrende Diode um die in Durchlassrichtung betriebene lasende Diode, was den Stromfluss auf den Bereich in der Laserstruktur beschränkt. Dies ist jedoch nicht mit der erfindungsgemäßen Ausführung für die hier genannten Schichten vergleichbar, da zum einen eine 3-

dimensional strukturierte Probe überwachsen wird und zum anderen die Schichtdicken der invers aufgewachsenen bzw. später betriebenen p-n Struktur in der Regel größer als die Raumladungszone sind.

Dabei wird in diesem Beispiel nicht auf eine mittlere Position des Fermi-niveaus abgezielt, sondern auf das Verhalten einer in Sperrrichtung betriebenen Diode. Die damit erzielbaren Spannungen bis zum Durchbruch wären durch die Limitierung der Dicke dieser sperrenden Diodenschichten gering, bei einer Laserstruktur aber durch den Stromfluss der Laserdiode in Durchlassrichtung durch den aktiven Bereich sowieso begrenzt.

10

Eine vorteilhafte Weiterbildung des Halbleiterschichtstapels im weiter unten beispielhaft ausgeführten Materialsystem der Gruppe-III-Nitride besteht darin, jeweils einen der folgenden Dotanden in der ersten Schicht (A) im Wechsel mit dem jeweils zweiten Dotanden in der zweiten Schicht (B) in Gruppe-III-Nitrid Halbleitern :

15

- Eisen und Kohlenstoff oder
- Kohlenstoff und einem Donator oder
- Eisen und Magnesium oder
- Eisen und Zink

20

zu dotieren.

Dabei sind auch Kombinationen dieser Dotanden in mehr als zwei Schichten oder teilweise in einer von mehreren Schichten möglich. Bei Dotierung mit flachen Donatoren wie Si oder Ge in GaN oder dem Akzeptor Mg in GaN kann es im Einzelfall auch günstig sein diese durchgehend in niedriger Konzentration zu dotieren und die kompensierende Störstelle, also einen tiefen Akzeptor bzw. Donator nur in einzelnen Schichtabschnitten zu dotieren, was durch die erfindungsgemäßen Ansprüche mit abgedeckt ist, da die Änderung der Lage des Fermi-niveaus in einer hypothetischen, unendlich ausgedehnten Einzelschicht entscheidend für die erfolgreiche Umsetzung ist, was auch in diesen Fällen gegeben ist.

25

30

Donatoren in Gruppe-III-Nitriden können tiefe, wie der auch durch C erzielbare, oder auch flache wie Si, Ge oder O sein. Jedoch sind bei Verwendung flacher Dotanden aufgrund der kleineren Raumladungszonenbreiten sehr dünne Schichten bzw. sehr niedrige Dotierstoffkonzentrationen notwendig um keine Schichten mit hoher Restleitfähigkeit zu erzeugen, also einen komplett an Ladungsträgern

35

verarmten Bereich zu erhalten was in Figur 5 gezeigt ist wo 10 nm dünne Einzelschichten verwendet werden. Erschwert wird die Umsetzung solch dünner Schichten durch Anströmeffekte sowie die Verschleppung von einigen Dotanden wie Mg in modernen Wachstumsprozessen wie z. B. mit der MOVPE.

5

Für die erfindungsgemäße Umsetzung bzw. ein Verfahren zur Herstellung eines Halbleiterschichtstapels sind zumindest folgende Schritte vorteilhaft:

10

- die Bereitstellung eines Substrats in einer Anlage zur Deposition von Halbleitern
- dem Aufbringen einer Folge von mindestens zwei Schichten (A, B), die als Einzelschichten jeweils eine energetische Lage des Fermi-niveaus (103) in der Halbleiterbandlücke (104, 105) aufweisen, für die Schicht (A)  $E_F - E_V < \frac{E_G}{2}$  gilt und für die Schicht (B)  $E_L - E_F < \frac{E_G}{2}$  gilt,

15

- wobei die Dicke (106, 107) der Schichten  $D_A$  und  $D_B$  (A, B) so gewählt ist, dass sich ein zusammenhängender Raumladungszonenbereich (110)  $W_A + W_B = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_s}{q} \left( \frac{N_A + N_B}{N_A \cdot N_B} \right)} \Psi_{bi}$  über die Schichten (A, B) ergibt und  $D_A \leq W_A$  sowie  $D_B \leq W_B$  gilt, mit  $W_A$  und  $W_B$  der Raumladungszone sowie  $N_A$  und  $N_B$  der Dotierstoffkonzentrationen in den Schichten A und B,  $\epsilon_s$  der Dielektrizitätskonstante,  $q$  der Elementarladung und  $\Psi_{bi}$  dem eingebauten Potentialunterschied, der identisch zum Energieunterschied der Fermi-niveaus ist.

20

Die Wahl der maximalen Dicke der Schichten ergibt sich aus einer numerischen Abschätzung der sich ausbildenden Raumladungszonenbreiten, wobei es vorteilhaft ist deutlich, d. h. mindestens einen Faktor zwei, besser fünf und ideal über 10 unter der berechneten Schichtdicke zu bleiben, da sich dann eine geringe Bandmodulation, d. h. ein sehr gleichmäßiger Bandverlauf, einstellt.

25

Im folgenden werden einige Ausführungsbeispiele und eine Beschreibung der Figuren am schon eingeführten Beispiel Galliumnitrid dargestellt.

30

Galliumnitrid ist ein heutzutage wichtiger Halbleiter für eine Vielzahl von Anwendungen wie z. B. LEDs für die Allgemeinbeleuchtung aber auch für die Leistungselektronik. Bauelemente werden als Dünnschichtmaterial kommerziell meist mit der MOVPE hergestellt.

35

Aufgrund von Eigendefekten und Verunreinigungen ist GaN meist leicht n-Typ leitend und selten hochohmig, dies meist aufgrund einer prozessbedingten Kohlenstoffverunreinigung. In frühen Arbeiten verwendete man die Akzeptoren Zink oder Magnesium, die Aktivierungsenergien  $> 150$  meV aufweisen um Hochohmigkeit zu erzielen, jedoch mit mäßigem Sperrverhalten, was an der durch diese Dotanden erzeugten relativ hohen Löcherkonzentration oberhalb von  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$  liegt. Eisen, ein häufig verwendeter Kompensator in III-V Halbleitern wird heutzutage teilweise für GaN eingesetzt. Die energetische Lage mit  $0,6$  eV unterhalb des Leitungsbandes führt jedoch zu einer relativ hohen verbleibenden Elektronenleitfähigkeit, welche nachteilig in den meisten elektronischen Bauelementen ist. Dies umso mehr, als unipolare Bauelemente im GaN System häufig elektronenleitend sind und daher Elektroneninjektion in die Isolationsschicht von solch einer Schicht nur mäßig gut blockiert wird. Alternativ wird Kohlenstoff eingesetzt. Intrinsisch dotiert führt er zu einem tiefen Akzeptor in der unteren Hälfte der GaN Bandlücke (ca.  $E_v+0,9$  eV) und einem Donator in der oberen Hälfte der Bandlücke. Mit einem Precursor wie z. B. Propan, oder einem anderen Kohlenwasserstoff bzw. Kohlenstoff enthaltenden Precursoren wie z. B.  $\text{CBr}_4$  bei Standard Wachstumsbedingungen dotiert baut sich Kohlenstoff hauptsächlich als tiefer Akzeptor ein.

Über den Einbau von Kohlenstoff als tiefer Akzeptor und gleichzeitig als tiefer Donator werden keine vorteilhaften Eigenschaften berichtet, was insofern nicht verwundert, da das Einstellen eines geeigneten Akzeptor/Donatorverhältnisses, das für ein Fermi-niveau möglichst nahe der Mitte der Bandlücke sorgen würde, mangels Kenntnis derzeit nicht möglich ist. Prinzipiell ist aber solch ein Einzeldotand, der zwei Niveaus erzeugt geeignet, wenn man das Verhältnis der beiden Niveaus durch die Wachstumsbedingungen einstellen kann. In Figur 2 und den Figuren 3, 4, und 5 werden die energetischen Lagen der Bänder relativ zum Fermi-niveau, das hier definitionsgemäß bei einem Wert von  $0$  eV liegt und durch die gestrichelte Linie repräsentiert wird, gezeigt.

Die obere durchgehende Kurve im jeweiligen Diagramm repräsentiert dabei das Leitungsband, die untere das Valenzband.

Figur 2 a) zeigt die Lage der Energiebänder bei Dotierung mit Fe, 2 b) bei Dotierung mit C. In beiden Fällen liegt das Fermi-niveau verhältnismäßig nahe am Leitungs- bzw. Valenzband. Daher ist die verbleibende Ladungsträgerkonzentration noch relativ hoch.

Will man nun eine hochohmige Einzelschicht erzielen so könnte man z. B. eine Einzelschicht mit Fe und C dotieren, wobei das Verhältnis der Dotanden die energetische Lage berücksichtigen muss.

5 Es ergibt sich bei einer energetischen Lage von  $E_L - 0,6$  eV für Fe und  $E_V + 0,9$  eV ein Verhältnis der Konzentrationen von ca. 5000. Dieses muss möglichst genau getroffen werden ist aber zugleich abhängig von der exakten, aber meist nur ungenau bekannten, energetischen Lage in der Bandlücke. Alleine deshalb ist es deutlich einfacher die Dotanden in Wechschichten zu dotieren, da dann die Kon-

10 zentration und die exakte energetische Lage der Dotanden stärker variieren dürfen bzw. weniger genau bekannt sein müssen. In einem n-Typ Halbleiter ist dann die Dicke für die Fe-dotierten Schichten dicker als für die C-dotierten, da die Akzeptoren nur Elektronen einfangen und das Fermi-niveau durch eine zu dicke GaN:C Schicht in etwa bei der energetischen Position des C in einem Mehrfach-

15 schichtstapel liegt. Simulationen ergeben für die GaN:Fe-Schicht, je nach Anwendungsfall, eine 5 bis 20 fache Schichtdicke im Vergleich zur GaN:C Schicht. Dies ist in Figur 3 beispielhaft gezeigt. Das Fermi-niveau ist in diesem Beispiel um 100-200 meV weiter vom Valenzband entfernt als mit einem Einzeldotanden was die Konzentration an Löchern weiter absenkt und damit den Widerstand erhöht.

20

Bei einer anderen Ausführung, der Kombination des flachen Donators Si und des tiefen Akzeptors C wird bei einer durchgehenden oder in einzelnen Schichten vorhandenen Si Konzentration von z. B.  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  die Dotierung von C in Konzentrationen von z. B.  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  nur in dünnen Schichten dotiert, die etwas dicker

25 sind als rein rechnerisch notwendig ist um alle durch Si erzeugten freien Elektronen einzufangen, also in diesem Beispiel etwas mehr als 1/10 des Volumens einzunehmen. Dies ist in Figur 4 für eine kurze Stapelfolge gezeigt. Sind die C-dotierten Schichten zu dick liegt das Fermi-niveau wieder nahe der C-Störstelle und es tritt eine leichte p-Leitfähigkeit auf. Will man ähnliches mit Mg und Fe umsetzen,

30 so muss ein ausreichender n-Typ Hintergrund vorhanden sein, sei es intrinsisch oder z. B. durch eine durchgehende Dotierung um diese erfolgreich zu kombinieren, ähnlich wie bei der Kombination von C und Fe nur dass zu hohe Mg Konzentrationen bzw. eine zu dicke GaN:Mg-Schicht zu einer merklichen p-Typ Leitung führen würde.

35

Besser geeignet ist in solch einem Fall ein tiefer Donator in der oberen Hälfte der Bandlücke in Kombination bzw. im Wechsel mit Mg. Hier könnte Ti oder der tiefe

C-Donator Verwendung finden, sofern er gezielt eingebaut werden kann. Prinzipiell kann auch mit flachen Störstellen im Wechsel leicht n- und p-dotiert werden, so dass die erfindungsgemäße komplette Verarmung über diese Schichten erfolgt. In Figur 5 ist dies für dünne Wechselschichten gezeigt, hier liegt das Fermi-niveau im Mittel fast perfekt in der Mitte der Energielücke.

Interessant sind Kombinationen tiefer Störstellen und flacher oder nur von flachen insofern, da z. B. Si und Mg meist an Gruppe-III-Nitrid Schichtabscheidungsanlagen vorhanden sind und somit höchstens ein tiefer Dotand anstelle von zweien vorgehalten werden muss. Einfacher zu handhaben sind jedoch Prozesse mit Dotanden, deren Energieniveaus so tief liegen, dass sie das Material prinzipiell verarmen, d. h. die Ladungsträgerkonzentration bei Verwendung selbiger unter  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  liegt. Bei Ladungsträgerkonzentrationen unterhalb von  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  ist dann eine Raumladungszonenbreite  $> 1 \mu\text{m}$  gegeben. Verwendet man Dotanden wie C oder Fe in einer Konzentration oberhalb der Elektronenkonzentration im undotierten Fall, so liegt die Ladungsträgerkonzentration im GaN normalerweise unter  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$  was eine Raumladungszone  $> 100 \mu\text{m}$  mit sich bringt. Daher ist dann die Bandverbiegung zwischen den wechsele-dotierten Schichten nur gering ausgeprägt und hauptsächlich hin zu den, sofern vorhanden, darüber und darunter liegenden stärker leitfähigen Schichten gegeben.

In Figur 1 a ist in einem Energie-Orts Diagramm schematisch gezeigt wie, ausgehend von einer Wechselschichtstruktur mit den unterschiedlich dotierten Schichten A und B die hier noch nicht in elektrischem Kontakt sind, sich diese entlang des elektrochemischen Potentials bzw. des Fermi-niveaus aufreihen. Hier sind 101 das Leitungsband  $E_c$ , 102 das Valenzband  $E_v$ , 103 das Fermi-niveau  $E_{\text{Dopant, Fermi}}$  welches in Figur 1 a mit der energetischen Lage der Dotierstoffe identisch sein soll, sofern die Konzentration der Dotanden jeweils so hoch ist, dass das Fermi-niveau an der energetischen Lage dieser gepinnt wird, was für eine erfindungsgemäße Ausführung nicht zwingend notwendig ist. D.h. auch eine nur teilweise vorliegende Kompensation der Hintergrundladungsträger und damit eine Lage des Fermi-niveaus die nicht identisch mit der energetischen Lage des Dotanden ist kann zu dem gewünschten Ergebnis führen ist aber schwieriger reproduzierbar umzusetzen. Die Dicke der Schichten A und B ist mit 106 und 107 angegeben und die jeweilige Bandlückenenergie mit 104 und 105 welche in der Homoepitaxie identisch sind aber sich prinzipiell auch unterscheiden kann. Bring man diese Schichten A



und B in elektrischen Kontakt entsteht eine Potentialdifferenz, die durch Ladungsverschiebung und daraus resultierender Bandverbiegung ausgeglichen wird. In

Figur 1 b ist dies für den Fall von sehr dicken Einzelschichten gezeigt, die so dick sind, dass die entstehenden Raumladungszonen (109) dünner als die halbe Dicke des Schichtpaars sind. Es entstehen in diesem Fall einzelne Raumladungszonen zwischen den unterschiedlich dotierten Bereichen, die für die ersten drei beispielhaft als schraffierte Flächen mit 109 gekennzeichnet sind. Die Raumladungszonen erstrecken sich jedoch nicht bis in den angrenzenden Übergang, sondern außerhalb der Raumladungszone sind die Bänder 101 und 102 flach und das Fermi-niveau 108 liegt gepinnt am Störstellenniveau. Nur innerhalb der Raumladungszone befindet es sich energetisch zwischen den beiden Störstellenniveaus. Nimmt die Dicke der Schichten ab, so entsteht ein Bereich der vollkommen von Raumladungszonen bzw. einer zusammenhängenden Raumladungszone (110) durchzogen ist, also über der gesamten Struktur ein durch die einzelnen Schichten moduliertes elektrisches Feld vorhanden ist wie in Figur 1 c gezeigt und in Figur 1 d für noch dünnere Schichten in einem immer flacheren Bandverlauf mündet, bei dem das Fermi-niveau 108 eine energetische Position zwischen der der Störstellenniveaus einnimmt. Hierbei ist die Abnahme der Schichtdicken aus Anschaulichkeitsgründen nicht grafisch umgesetzt bzw. die horizontale Achse des Abstands in einem anderen Maßstab dargestellt als in Figur 1 b. Da die Ladungen, die hier durch die Potentialunterschiede verschoben werden bzw. die ortsfesten Ladungen ionisierter Störstellen nur noch in einer geringen Konzentration vorhanden sind, erstreckt sich die Bandverbiegung über einen großen Bereich und führt zu einem im Mittel nahezu flachen Bandverlauf. In einer realen Struktur ergibt sich eine zusätzliche Bandverbiegung ausgehend von der Oberfläche bzw. dotierten Schichten an den Rändern der Wechselschichtstruktur, die hier nicht berücksichtigt ist und meist die gesamte Struktur überlagert.

Figur 6 zeigt als Beispiel den Vergleich von Strom-Spannungs-Kennlinien a) und den daraus berechneten Widerstand b) zwischen einem oberen Metallkontakt und dem leitfähigen Substrat von unterschiedlich dotierten Pufferschichten einer GaN-basierten Feldeffekttransistorstruktur auf Silizium (111). Dabei zeigt die Probe mit einem Fe-dotierten GaN Puffer den höchsten Strom gefolgt vom C-dotierten Puffer, wie man es auch von der Lage der Dotanden ( $Fe \approx E_L - 0,6 \text{ eV}$ ;  $C \approx E_C + 0,9 \text{ eV}$ ) her erwartet. Nimmt man nun diese Dotierungen und stellt eine Probe mit einem ca. 3  $\mu\text{m}$  dicken Puffer aus abwechselnd 200 nm dicken Fe- und C-dotierten GaN

Schichten her, so ist der Strom geringer, obwohl Fe-dotierte oder C-dotierte Schichten alleine einen höheren Strom aufweisen, d. h. der spezifische Widerstand der Einzelschichten geringer ist. In der erfindungsgemäßen Kombination von im Wechsel aufeinander folgenden Fe- und C-dotierten Einzelschichten weisen sie jedoch den niedrigsten Strom und höchsten Widerstand auf.

Bei solchen Strukturen auf Silizium werden zur Vermeidung thermisch bedingter Risse Al-haltige Zwischenschichten in das GaN eingebracht. Dabei ist es aufgrund der entstehenden Ladungen an den Grenzflächen vorteilhaft das GaN nach der Al-haltigen Zwischenschicht mit Fe zu dotieren und davor mit C, da in Wachstumsrichtung gesehen oberhalb der Zwischenschicht potentiell eine Anhäufung von Löchern und unterhalb von Elektronen auftritt, die so ideal kompensiert werden kann.

Überprüfen lässt sich die erfindungsgemäße Anwendung am einfachsten z. B. mit massenspektroskopischen Verfahren wie der Sekundärionenmassenspektroskopie (SIMS) oder anhand der Defektlumineszenz in hochauflösenden Verfahren wie der Kathodolumineszenz im Rasterelektronenmikroskop bzw. dem Rastertransmissionselektronenmikroskop. Auch können Dotanden und deren Einbauort zum Teil mit hoch ortsauflösender Ramanspektroskopie identifiziert werden.

Die Erfindung bezieht sich auf alle Halbleiter und Dotanden. Insbesondere für einige Halbleiter mit kleiner Bandlücke liegen die Werte für die anzustrebende Ladungsträgerkonzentration durch einen Kompensator höher als hier für GaN mit  $E_G \approx 3,4$  eV beschrieben, da diese Halbleiter höhere Ladungsträgerkonzentrationen und Eigenleitfähigkeiten aufweisen. Sie müssen, wie andere Werte auch, entsprechend der Bandlückenenergie und der Zustandsdichte und den daraus resultierenden intrinsischen Ladungsträgerkonzentrationen angepasst werden um einen erfindungsgemäßen Effekt erzielen zu können. Auch sind prinzipiell mehr als zwei Dotanden und diese auch in mehr als zwei Wechselschichten möglich und Bestandteil einer erfindungsgemäßen Ausführung. Auch kann die häufig vorhandene Eigenleitung  $n$  oder  $p \gg n_i$  in einer Schicht anstelle eines Dotanden in einer Schicht genutzt werden. Eine dotierte Schicht kann zudem auch in eine andere überlappen, d. h. die Dotierungen müssen nicht abrupt am nominellen Ende der Schicht enden und ein Überlapp kann, je nach Art und energetischer Lage der Dotanden, auch vorteilhaft sein. Auch die Reihenfolge der in den Ansprüchen genannten Schichten A und B ist austauschbar und weitere Schichten dazwischen möglich, so lange die Bedingung eines zusammenhängenden Raumladungszonenbereichs

erfüllt ist. Die Beschreibung der Lage des Fermi-niveaus bezieht sich immer auf den Fall ohne angelegte externe Spannung an den Schichten.

## Patentansprüche

1. Halbleiterschichtstapel, gekennzeichnet durch

5 mindestens zwei Schichten (A, B), die als Einzelschichten jeweils eine energetische Lage des Fermi-niveaus (103) in der Halbleiterbandlücke (104, 105) aufweisen, für die Schicht (A)  $E_F - E_V < \frac{E_G}{2}$  gilt und für die Schicht (B)  $E_L - E_F < \frac{E_G}{2}$  gilt, mit  $E_F$  der energetischen Lage des Fermi-niveaus (103),  $E_V$  der energetischen Lage eines Valenzbands (102),  $E_L$  der energetischen Lage eines Leitungsbands (101) und  $E_L - E_V$  der Energiedifferenz der Halbleiterbandlücke  $E_G$  (104, 105), wobei die Dicke (106, 107) der Schichten (A, B) so gewählt ist, dass sich ein zusammenhängender Raumladungszonenbereich (110) über die Schichten (A, B) ergibt.

15 2. Halbleiterschichtstapel nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch

eine extrinsische oder intrinsische Dotierung resultierend in mindestens zwei Störstellenniveaus, die jeweils eine energetische Lage aufweisen für die in einer Schicht (A)  $E_F - E_V < \frac{E_G}{2}$  gilt und einer andern Schicht (B)  $E_L - E_F < \frac{E_G}{2}$  gilt in einer Konzentration, dass das Fermi-niveau an solchen unendlich dicken Einzelschichten dieselbe energetische Lage wie die Störstellenniveaus mit einer Toleranz von  $\pm 50$  meV einnimmt, wobei die Dicken der Schichten im Halbleiterschichtstapel so gewählt sind, dass sich ein zusammenhängender Raumladungszonenbereich (110) über den Gesamtschichtstapel ausbildet.

25

3. Halbleiterschichtstapel nach Anspruch 1 oder 2, gekennzeichnet durch

eine Energieposition der durch die Dotierung erzeugten tiefen Störstellenniveaus, für die in der Schicht (A)  $E_F - E_V < \frac{E_G \cdot 0.8}{2}$  gilt und für die in der Schicht (B)  $E_L - E_F < \frac{E_G \cdot 0.8}{2}$  gilt.

30

4. Halbleiterschichtstapel nach Anspruch 1 oder 2, gekennzeichnet durch

eine mittlere Fermienergieposition  $E_F$  (108) in einem Energiebereich  $\frac{E_G}{2} - E_G \cdot$

5  $0.2 < E_F < \frac{E_G}{2} + E_G \cdot 0.2$  im Raumladungszonenbereich (110) .

5. Halbleiterschichtstapel nach mindestens einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch

10 die Dotierung mit akzeptorartigen oder mit donatorartigen Dotanden.

6. Halbleiterschichtstapel nach mindestens einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch

15 die Dotierung mit akzeptorartigen und donatorartigen Dotanden.

7. Halbleiterschichtstapel nach mindestens einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch

20 jeweils einen der folgenden Dotanden in der ersten Schicht (A) im Wechsel mit dem jeweils zweiten Dotanden in der zweiten Schicht (B) in Gruppe-III-Nitrid Halbleitern:

- Eisen und Kohlenstoff oder
- 25 • Kohlenstoff und einem Donator oder
- Eisen und Magnesium oder
- Eisen und Zink.

30

8. Halbleiterschichtstapel nach mindestens einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch

5 eine Abfolge von mindestens zwei Schichtpaketen, beinhaltend mindestens zwei Schichten (A, B) mit einer Fermineaulage für die als Einzelschicht in Schicht (A)  $E_F - E_V < \frac{E_G}{2}$  gilt und für die als Einzelschicht in Schicht (B)  $E_L - E_F < \frac{E_G}{2}$  gilt.

10 9. Bauelementmodul, umfassend mindestens ein Bauelement, beinhaltend einen Halbleiterschichtstapel nach einem der vorhergehenden Ansprüche.

10. Verfahren zur Herstellung eines Halbleiterschichtstapels beinhaltend zumindest folgende Schritte:

15

die Bereitstellung eines Substrats in einer Anlage zur Deposition von Halbleitern

dem Aufbringen einer Folge von mindestens zwei Schichten (A, B), die als Einzelschichten jeweils eine energetische Lage des Fermineaus (103) in der Halbleiterbandlücke (104, 105) aufweisen, für die Schicht (A)  $E_F - E_V < \frac{E_G}{2}$  gilt

20

und für die Schicht (B)  $E_L - E_F < \frac{E_G}{2}$  gilt, wobei die Dicke (106, 107) der Schichten  $D_A$  und  $D_B$  (A, B) so gewählt ist, dass sich ein zusammenhängender

Raumladungszonenbereich (110)  $W_A + W_B = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_s}{q} \left( \frac{N_A + N_B}{N_A \cdot N_B} \right) \Psi_{bi}}$  über die

Schichten (A, B) ergibt und  $D_A \leq W_A$  sowie  $D_B \leq W_B$  gilt, mit  $W_A$  und  $W_B$  der

25

Raumladungszone sowie  $N_A$  und  $N_B$  der Dotierstoffkonzentrationen in den Schichten A und B,  $\epsilon_s$  der Dielektrizitätskonstante,  $q$  der Elementarladung und  $\Psi_{bi}$  dem eingebauten Potentialunterschied, der identisch zum Energieunterschied der Fermineaus ist.

Figur 1

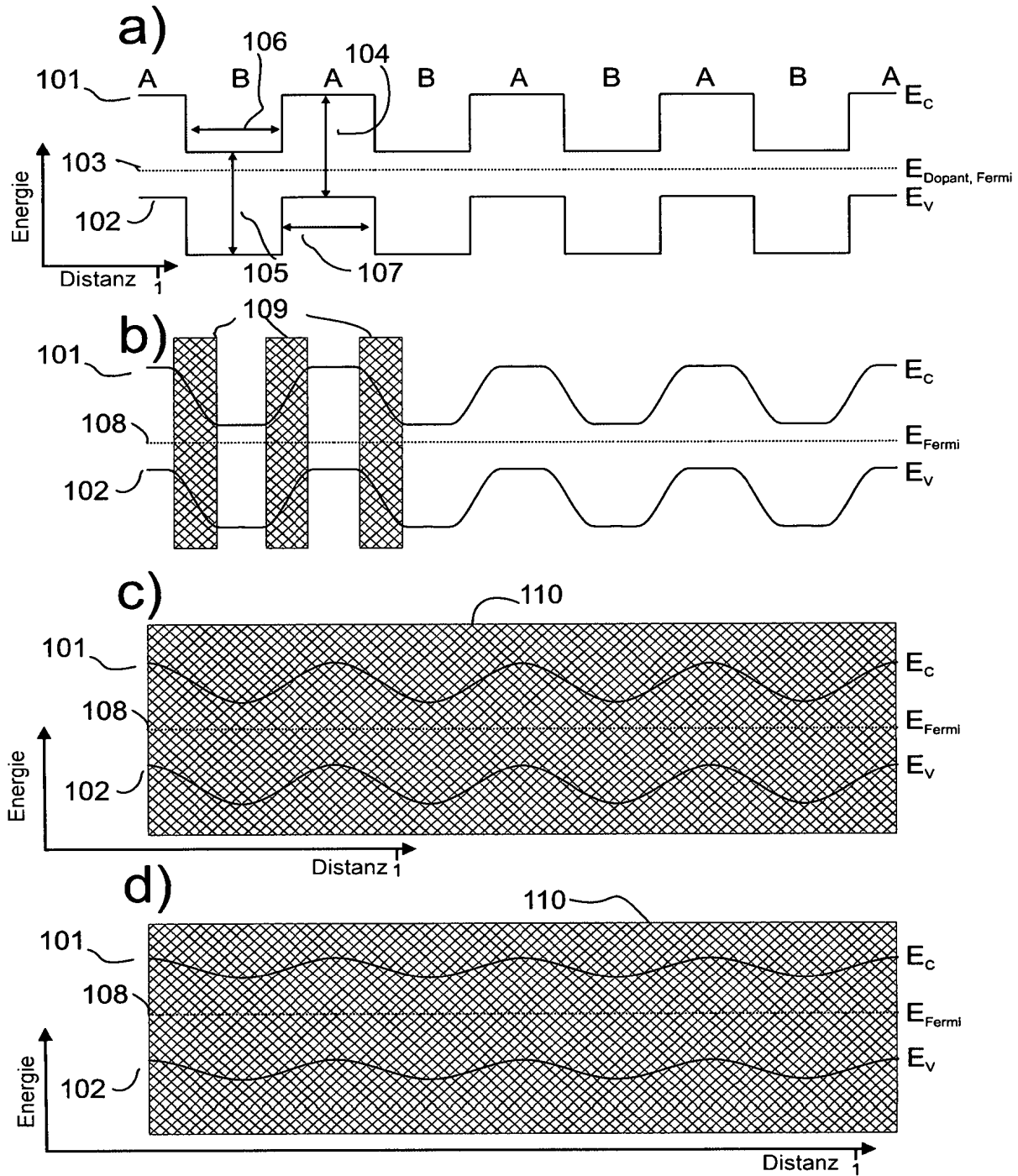


Fig. 2a

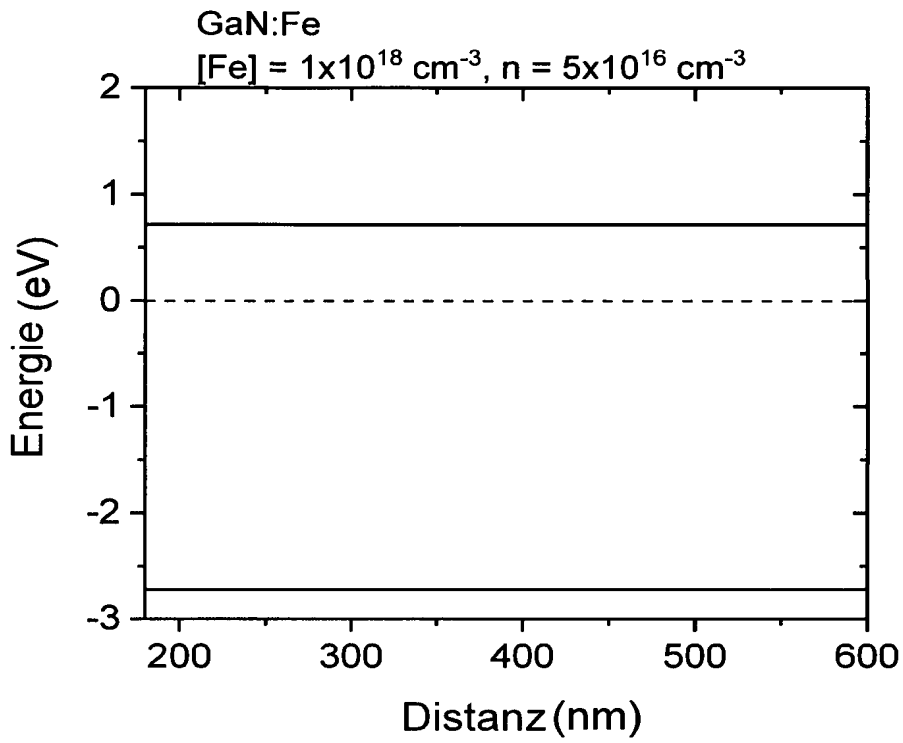


Fig. 2b

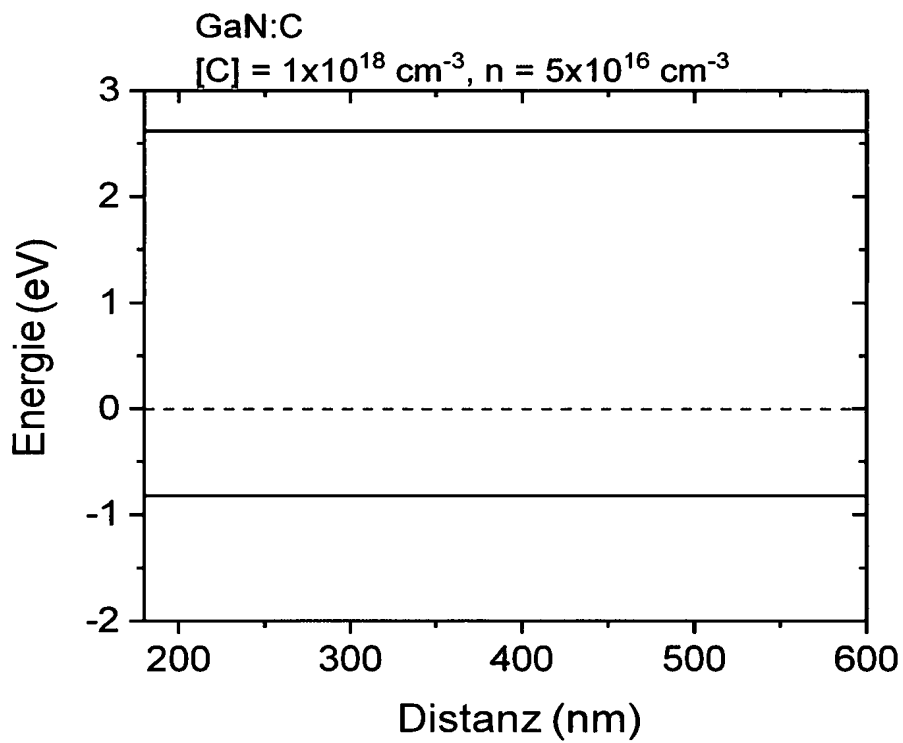




Fig. 3

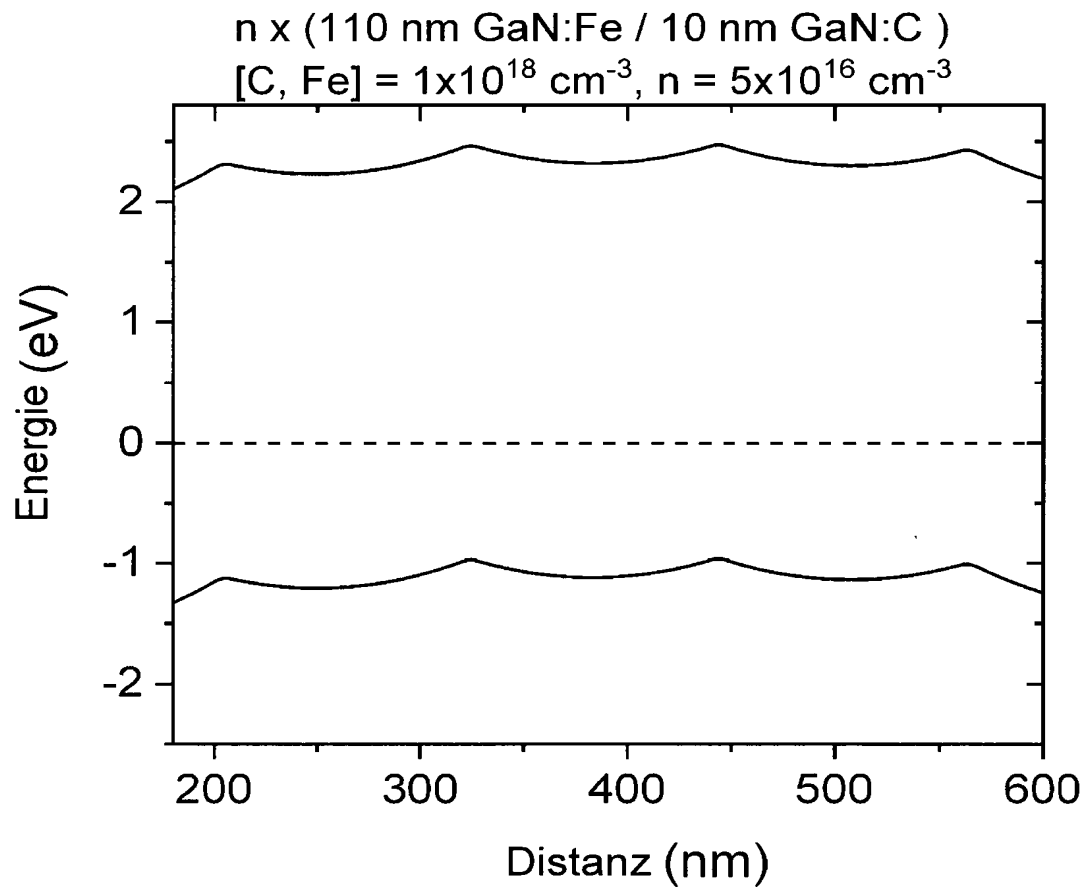


Fig. 4

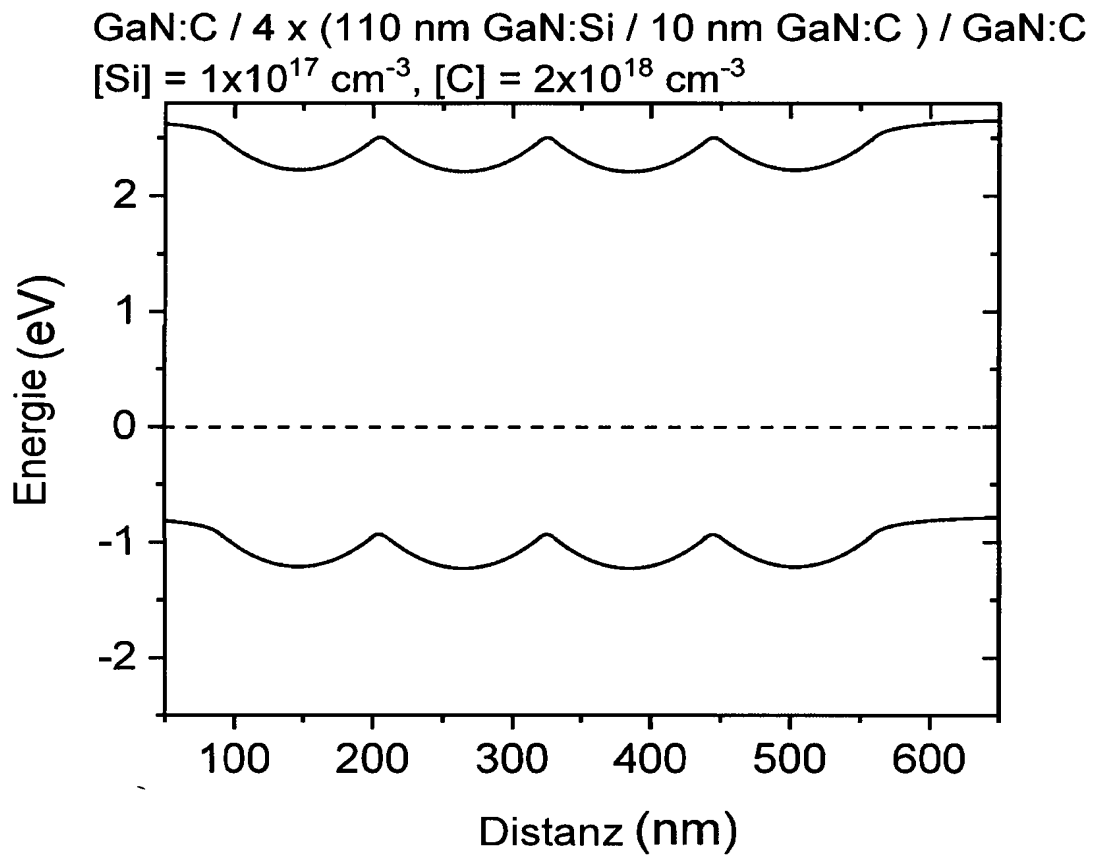


Fig. 5

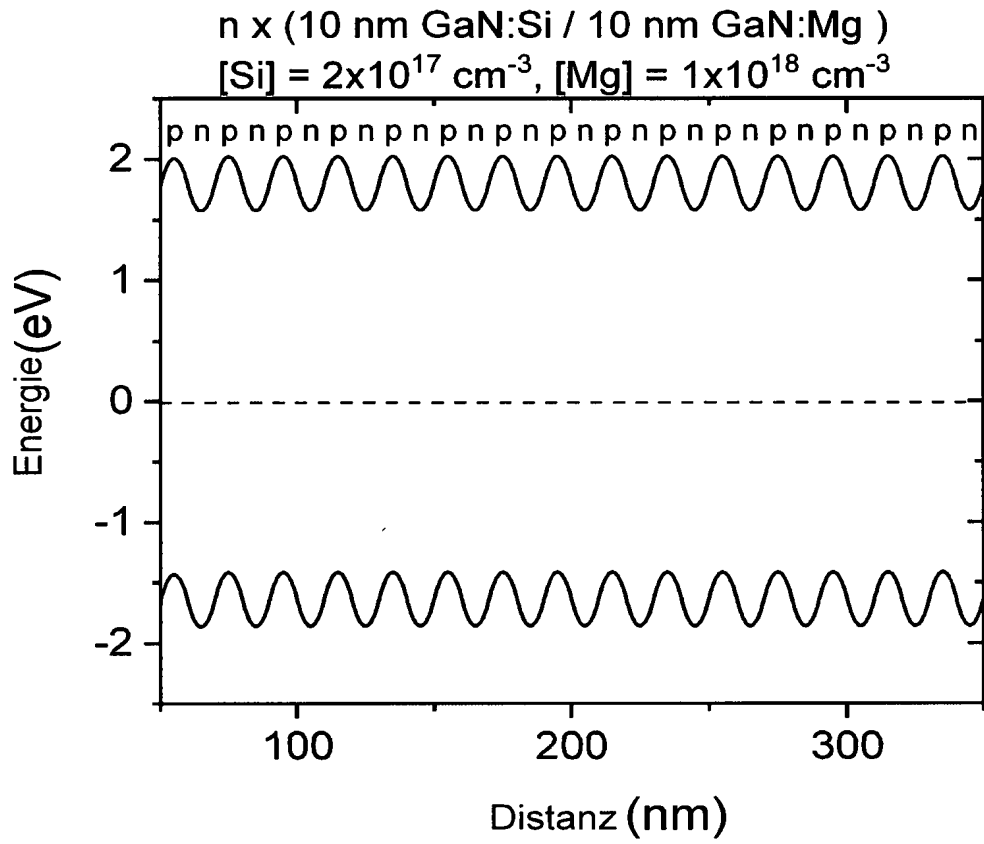


Fig. 6a

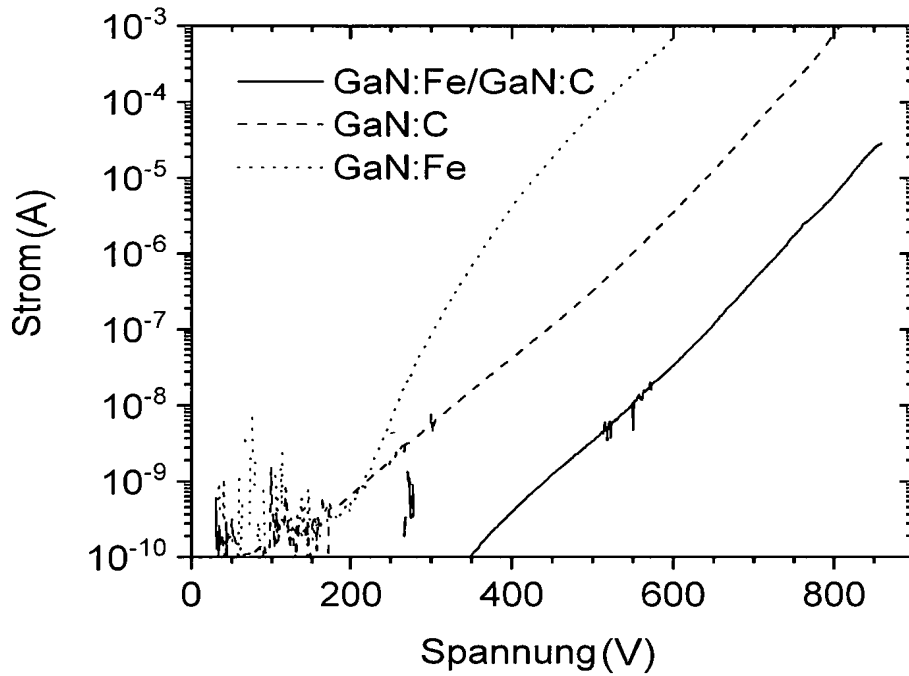
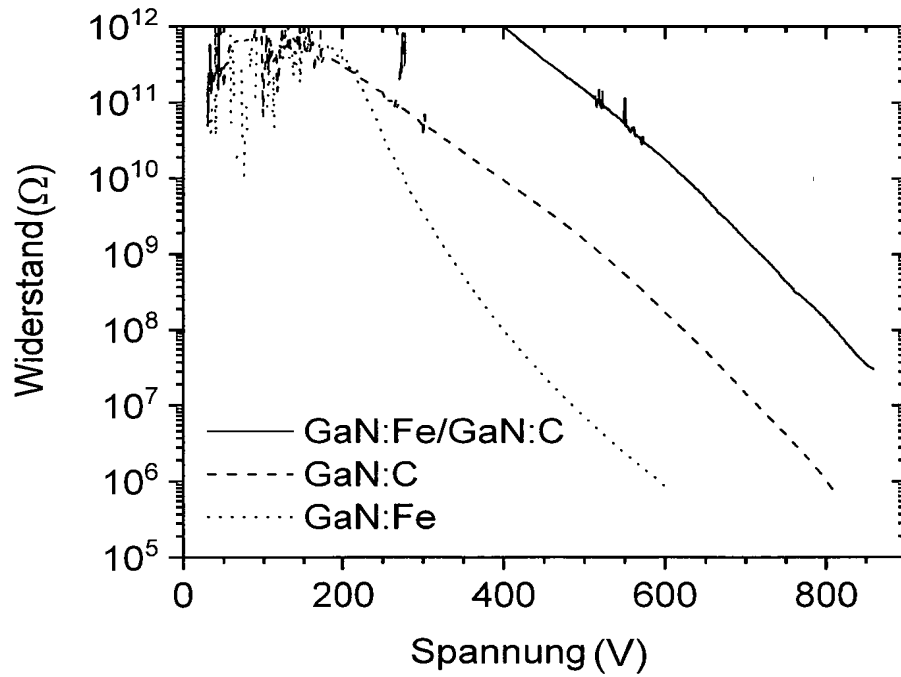


Fig. 6b



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

**PCT/DE2019/100572**

<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b>		
<i>H01L 29/15</i> (2006.01)i; <i>H01L 29/20</i> (2006.01)i; <i>H01L 29/207</i> (2006.01)i		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
<b>B. FIELDS SEARCHED</b>		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)		
H01L		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
EPO-Internal, WPI Data, INSPEC, COMPENDEX		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	CN 104617160 A (5TH ELECTRONIC RES INST MIIT) 13 May 2015 (2015-05-13) figures 3-4 and associated text	1-10
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>“D” document cited by the applicant in the international application</p> <p>“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p> <p>“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>“&amp;” document member of the same patent family</p>		
Date of the actual completion of the international search		Date of mailing of the international search report
26 November 2019		04 December 2019
Name and mailing address of the ISA/EP		Authorized officer
<b>European Patent Office</b> <b>p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk</b> <b>Netherlands</b> Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		<b>Moehl, Sebastian</b>  Telephone No.

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
**Information on patent family members**

International application No.

**PCT/DE2019/100572**

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN 104617160 A	13 May 2015	NONE	

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES  
 INV. H01L29/15 H01L29/20 H01L29/207  
 ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole )  
 H01L

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data, INSPEC, COMPENDEX

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	CN 104 617 160 A (5TH ELECTRONIC RES INST MIIT) 13. Mai 2015 (2015-05-13) Abbildungen 3-4 und zugehöriger Text -----	1-10

Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

Siehe Anhang Patentfamilie

\* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

- "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist  
 "E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist  
 "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)  
 "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht  
 "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

26. November 2019

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

04/12/2019

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde  
 Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2  
 NL - 2280 HV Rijswijk  
 Tel. (+31-70) 340-2040,  
 Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Moehl, Sebastian

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/DE2019/100572

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
CN 104617160	A	13-05-2015	KEINE
-----			