



(10) **DE 10 2020 108 777 A1** 2021.09.30

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2020 108 777.2**

(22) Anmeldetag: **30.03.2020**

(43) Offenlegungstag: **30.09.2021**

(51) Int Cl.: **H01L 29/778** (2006.01)

H01L 29/20 (2006.01)

(71) Anmelder:
**Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg,
Körperschaft des öffentlichen Rechts, 39106
Magdeburg, DE**

(72) Erfinder:
**Dadgar, Armin, Prof., 10555 Berlin, DE; Challa,
Seshagiri Rao, 39104 Magdeburg, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

US 2018 / 0 138 304 A1

Nguyen, X. S. [u.a.]: MOCVD Growth of High Quality InGaAs HEMT Layers on Large Scale Si Wafers for Heterogeneous Integration With Si CMOS. In: IEEE Transaction on Semiconductor Manufacturing, Vol. 30, 2017, No. 4, 456 - 461.

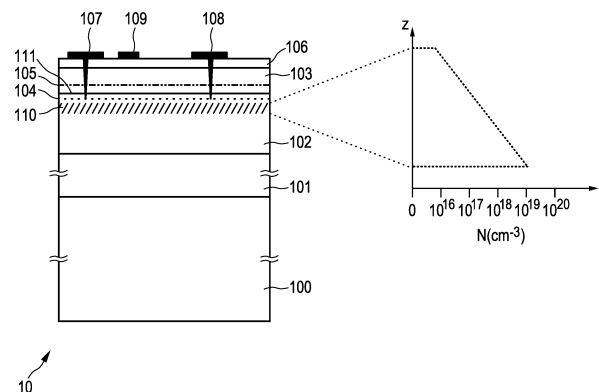
Palacios, T. [u.a.]: AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors With InGaIn Back-Barriers. In: Electron Device Letters, Vol. 27, 2006, No. 1, 13 - 15.

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Feldeffekttransistor**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft einen Feldeffekttransistor mit unteren und oberen Halbleiterschichten, wobei unterhalb der oberen Halbleiterschicht mit Abstand zur oberen Halbleiterschicht eine Ladungsträgerreservoirschicht ausgebildet ist, welche im Vergleich zur Umgebung eine erhöhte Ladungsträgerdichte aufweist und dafür sorgt, dass strahlungsbedingte Schäden nur einen geringen Einfluss auf die elektrischen Charakteristika des Feldeffekttransistors haben.



Beschreibung

[0001] Feldeffekttransistoren werden beispielsweise für Verstärker- und Regelanwendungen eingesetzt. Dabei gibt es verschiedene Ausführungen, beispielsweise mit Metall-Halbeiter-Gate-Kontakten oder mit Metall-Isolator-Gate-Kontakten in Silizium, bei welchen eine Gatespannung die Leitfähigkeit zwischen einem Sourcekontakt und einem Drainkontakt steuert. In Verbindungshalbleitern werden solche Transistoren meist als Heterostrukturen realisiert, in welchen der leitfähige Kanal an der Heterogrenzfläche von zwei Materialien mit unterschiedlicher Bandlücke entsteht. Dort kann beispielsweise in Gruppe-III-Nitriden durch die unterschiedliche Polarisierung der Materialien eine Ladungsträgeranhäufung entstehen. In Gruppe-III-Arseniden und in Phosphiden können beispielsweise durch eine Dotierung im Material mit der größeren Bandlücke Ladungsträger erzeugt werden, welche sich an der Grenzfläche ansammeln. Im idealen Fall bildet sich dort ein zweidimensionales Elektronengas aus, das eine hohe Ladungsträgermobilität aufweist und prädestiniert für Hochfrequenzanwendungen und effiziente Spannungswandler ist.

[0002] Insbesondere Bauelemente, welche auf Gruppe-III-Nitriden basieren, jedoch auch andere Bauelemente sind hochinteressant für Anwendungen bei hohen Temperaturen oder auch unter hohen Dosen ionisierender Strahlung, wie sie insbesondere im Weltraum vorhanden sind. Obwohl die prinzipielle Funktion dieser Bauelemente auch unter extremen Bedingungen lange erhalten bleibt, ändern sich bei hohen Dosen die Kenndaten von Transistoren. So kann beispielsweise ein Strom absinken, d.h. ein Kanalwiderstand kann sich erhöhen. Des Weiteren kann sich eine Einsatzspannung ändern, bei welcher die am Gate angelegte Spannung, je nach Ausführung des Bauelements, den Kanal öffnet oder schließt. Durch diese Änderung kann ein Schaltkreis nach langer Bestrahlung seine eigentliche Funktion verlieren oder es müssen Vorkehrungen zur Anpassung einer Steuerspannung des Gates an die veränderten Bauelementeigenschaften getroffen werden.

[0003] Wesentlich für diese Änderung scheint bei Feldeffekttransistoren der Eintrag von Defekten im Bereich unter dem Kanal zu sein, wobei solche Defekte Ladungsträger aus der Umgebung einfangen, wodurch die Ladungsträgerdichte abnimmt und sich die Einsatzspannung verschiebt.

[0004] Es ist eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, einen Feldeffekttransistor alternativ, beispielsweise mit verbesserter Strahlungsresistenz, bereitzustellen. Dies wird erfindungsgemäß durch einen Feldeffekttransistor nach Anspruch 1 erreicht. Vorteilhafte Ausgestaltungen können beispielsweise den Unteransprüchen entnommen werden. Der Inhalt der

Ansprüche wird durch ausdrückliche Inbezugnahme zum Inhalt der Beschreibung gemacht.

[0005] Die Erfindung betrifft einen Feldeffekttransistor. Der Feldeffekttransistor weist eine untere Halbleiterschicht mit einer ersten Bandlücke auf. Der Feldeffekttransistor weist eine obere Halbleiterschicht mit einer zweiten Bandlücke auf. Die zweite Bandlücke ist unterschiedlich zur ersten Bandlücke. Die obere Halbleiterschicht ist auf der unteren Halbleiterschicht angeordnet.

[0006] Der Feldeffekttransistor weist einen Sourcekontakt auf, welcher die untere Halbleiterschicht kontaktiert. Der Feldeffekttransistor weist einen Drainkontakt auf, welcher die untere Halbleiterschicht kontaktiert. Des Weiteren weist der Feldeffekttransistor eine Gatestruktur auf, welche auf der oberen Halbleiterschicht angeordnet ist.

[0007] Unterhalb der oberen Halbleiterschicht ist mit Abstand zur oberen Halbleiterschicht eine Ladungsträgerreservoirschicht ausgebildet, welche im Vergleich zur Umgebung eine erhöhte Ladungsträgerdichte aufweist.

[0008] Mittels eines solchen Feldeffekttransistors kann die Resistenz gegen ionisierende Strahlung, welche beispielsweise im Weltraum auftritt, deutlich erhöht werden. Dies liegt daran, dass die Ladungsträgerreservoirschicht ein Reservoir an Ladungsträgern bereitstellt, welche in Defekte, die sich aufgrund von Strahlung ausbilden, übergehen und die Defekte damit neutralisieren können. Dadurch wird verhindert, dass die Defekte aufgrund eines etwaigen Einfangs von Ladungsträgern von außerhalb der Ladungsträgerreservoirschicht signifikante Wirkungen auf die elektrischen Eigenschaften des Feldeffekttransistors haben.

[0009] Durch die Bezeichnungen „untere Halbleiterschicht“ und „obere Halbleiterschicht“ wird eine räumliche Orientierung im Feldeffekttransistor eingeführt. Dies kann beispielsweise bedeuten, dass in einer realen Anordnung die untere Halbleiterschicht tatsächlich unterhalb der oberen Halbleiterschicht angeordnet ist. Dies ist jedoch nicht zwingend. Diese Bezeichnungen dienen lediglich dazu, die räumlichen Verhältnisse im Feldeffekttransistor zu definieren und sind unabhängig davon, wie der Feldeffekttransistor relativ zur Erdoberfläche steht. Wird der Feldeffekttransistor beispielsweise gedreht, so kann sich - bezogen auf ein externes Bezugssystem wie beispielsweise die Erdoberfläche - auch die untere Halbleiterschicht oberhalb der oberen Halbleiterschicht befinden. In typischen Wachstumsprozessen wird jedoch beispielsweise die untere Halbleiterschicht zuerst gewachsen und dann wird die obere Halbleiterschicht darauf gewachsen, wobei auch dies nicht zwingend

ist und auch in anderen geometrischen Orientierungen erfolgen kann.

[0010] Durch den Unterschied zwischen den beiden erwähnten Bandlücken wird typischerweise in der unteren Halbleiterschicht ein Ladungsträgerkanal, also beispielsweise ein Elektronenkanal oder ein Löcherkanal, ausgebildet. Beispielsweise können die jeweiligen Ladungsträger ein zweidimensionales Elektronengas oder ein zweidimensionales Löchergas ausbilden. Dies kann beispielsweise auch durch eine zusätzliche Dotierung unterstützt werden, beispielsweise wie weiter unten näher beschrieben werden wird.

[0011] Sourcekontakt und Drainkontakt dienen typischerweise dazu, einen elektrischen Anschluss eines in der unteren Halbleiterschicht ausgebildeten Kanals zu erreichen. Sie sind typischerweise so ausgebildet, dass sie den leitfähigen Kanal bzw. ein ausgebildetes Elektronengas oder Löchergas kontaktieren. Beispielsweise kann am Drainkontakt relativ zum Sourcekontakt eine elektrische Spannung angelegt werden, wobei mittels des Feldeffekttransistors der Stromfluss gesteuert werden kann. Hierzu kann insbesondere mittels der Gatestruktur eine Steuerspannung angelegt werden, wobei beispielsweise bei Ausbildung eines Ladungsträgerkanals im Grundzustand (was einer Ausbildung als im Grundzustand eingeschalteter Transistor entspricht, auch als „normally on“ bezeichnet) durch Verdrängung dieser Ladungsträger ein hochohmiger Zustand erreicht werden kann, wohingegen im Grundzustand eine gute Leitfähigkeit vorhanden ist. Auch die entgegengesetzte Ausführung ist jedoch möglich. Die Gatestruktur kann insbesondere einen Heteroübergang und/oder eine nicht oder schlecht elektrisch leitende Schicht wie beispielsweise ein Dielektrikum aufweisen, um eine Entkopplung von den Halbleiterschichten zu erreichen. Typischerweise ist an der Gatestruktur ein gut elektrisch leitfähiges Material ausgebildet, mittels welchem eine Gatespannung als Steuerspannung angelegt werden kann. Das erwähnte gut elektrisch leitfähige Material kann insbesondere mittels des erwähnten Heteroübergangs und/oder mittels des erwähnten Dielektrikums oder einer anderen schlecht elektrisch leitfähigen Schicht vom Rest des Feldeffekttransistors elektrisch isoliert sein. Das gut elektrisch leitfähige Material kann auch als Gatekontakt bezeichnet werden. Die Gatestruktur bzw. der Gatekontakt ist dabei typischerweise zwischen Sourcekontakt und Drainkontakt, beispielsweise lateral zwischen Sourcekontakt und Drainkontakt, ausgebildet.

[0012] Die obere Halbleiterschicht kann beispielsweise unter der Gatestruktur bzw. einem Gatekontakt verdünnt, beispielsweise teilweise weggeätzt sein. Sie kann auch erheblich verdünnt bzw. fast ganz weggeätzt sein. Derartige Ausführungen können ins-

besondere für einen Feldeffekttransistor vom Anreicherungsstyp verwendet werden.

[0013] Die erhöhte Ladungsträgerdichte kann beispielsweise einen Wert von mindestens $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, mindestens $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, mindestens $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ oder mindestens $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ aufweisen. Sie kann insbesondere auch einen Wert von höchstens $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, höchstens $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, höchstens $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ oder höchstens $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ aufweisen. Als besonders bevorzugt hat sich ein Wert zwischen $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ und $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ für typische Ausführungen herausgestellt. Auch andere Werte, insbesondere mit den hier angegebenen unteren und/oder oberen Werten, können jedoch verwendet werden.

[0014] Der Abstand der Ladungsträgerreservoirschicht zur oberen Halbleiterschicht kann beispielsweise mindestens 5 nm, mindestens 10 nm, mindestens 20 nm, mindestens 30 nm oder mindestens 40 nm betragen. Der Abstand der Ladungsträgerreservoirschicht zur oberen Halbleiterschicht kann auch höchstens 10 nm, höchstens 20 nm, höchstens 30 nm, höchstens 40 nm oder höchstens 50 nm betragen. Insbesondere kann der Abstand der Ladungsträgerreservoirschicht zur oberen Halbleiterschicht zwischen 5 nm und 50 nm betragen.

[0015] Die Ladungsträgerreservoirschicht kann insbesondere eine Dicke von mindestens 5 nm, mindestens 10 nm, mindestens 20 nm, mindestens 30 nm oder mindestens 40 nm aufweisen. Die Ladungsträgerreservoirschicht kann auch eine Dicke von höchstens 10 nm, höchstens 20 nm, höchstens 30 nm, höchstens 40 nm oder höchstens 50 nm aufweisen. Insbesondere kann die Dicke zwischen 5 nm und 50 nm betragen.

[0016] Grundsätzlich können alle genannten unteren Werte mit allen genannten größeren oberen Werten kombiniert werden, um geeignete Intervalle zu bilden.

[0017] Die eben genannten Bereiche von Abstand der Ladungsträgerreservoirschicht zur oberen Halbleiterschicht und Dicke der Ladungsträgerreservoirschicht haben sich für typische Anwendungen als vorteilhaft herausgestellt.

[0018] Die Ladungsträgerreservoirschicht kann insbesondere in der unteren Halbleiterschicht ausgebildet sein. Dies ist insbesondere bei den eben genannten Abständen und Dicken der Fall.

[0019] Als Abstand der Ladungsträgerreservoirschicht zur oberen Halbleiterschicht kann insbesondere ein Abstand zwischen der oberen Halbleiterschicht, welche beispielsweise durch ein unterschiedliches Material von der unteren Halbleiterschicht abgegrenzt werden kann, und einer Stelle

oder Fläche, an welcher die Dotierung oder Ladungsträgerdichte der Ladungsträgerreservoirschiicht einen Schwellenwert von beispielsweise $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ übersteigt, angesehen werden. Als Dicke der Ladungsträgerreservoirschiicht kann beispielsweise ein Abstand zwischen zwei Stellen oder Flächen, an welchen ein solcher Schwellenwert von beispielsweise $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ erreicht wird, angesehen werden. Auch andere Definitionen sind hier jedoch grundsätzlich möglich.

[0020] Die Ladungsträgerreservoirschiicht kann insbesondere durch Dotierung ausgebildet werden. Hierzu kann ein Dotierstoff eingebracht werden, welcher zu einer erhöhten Ladungsträgerdichte führt. Die Dotierung kann beispielsweise mit Silizium, Germanium, Schwefel, Selen und/oder Tellur ausgebildet sein. Derartige Dotierstoffe haben sich zur Ausbildung von typischen Ladungsträgerreservoirschiichten als vorteilhaft erwiesen. Die Dotierung kann beispielsweise in die untere Halbleiterschicht eingebracht werden.

[0021] Die Ladungsträgerreservoirschiicht kann alternativ oder zusätzlich auch durch einen Halbleiterheteroübergang ausgebildet sein. Auch mittels eines solchen Halbleiterheteroübergangs kann eine höhere Ladungsträgerdichte erreicht werden.

[0022] Der Halbleiterheteroübergang kann insbesondere in einem Abstand von mindestens 20 nm, mindestens 30 nm oder mindestens 40 nm zur oberen Halbleiterschicht angeordnet sein. Er kann auch in einem Abstand von höchstens 30 nm, höchstens 40 nm oder höchstens 50 nm zur oberen Halbleiterschicht angeordnet sein. Insbesondere kann der Halbleiterheteroübergang in einem Abstand von 20 nm bis 50 nm zur oberen Halbleiterschicht angeordnet sein. Derartige Werte haben sich für typische Anwendungsfälle als vorteilhaft erwiesen.

[0023] Ein Halbleiterübergang kann insbesondere in zwei Übergänge untergliedert sein. Dabei kann beispielsweise ein Übergang der Funktionalität des Bauelements dienen, und ein weiterer Übergang kann zur Ausbildung eines Reservoirs dienen.

[0024] Gemäß einer Ausführung weist die Ladungsträgerreservoirschiicht eine mit zunehmendem Abstand von der oberen Halbleiterschicht ansteigende Ladungsträgerdichte auf. Dadurch kann die Ladungsträgerdichte in der Nähe zu einem Kanal noch eher gering gehalten werden, insbesondere um eine Beeinträchtigung der Beweglichkeit von Ladungsträgern im Kanal zu vermeiden. Mit zunehmendem Abstand von der oberen Halbleiterschicht und damit auch vom Kanal wird der Einfluss einer Dotierung oder anderer Maßnahmen zur Erhöhung der Ladungsträgerdichte auf die Beweglichkeit der Ladungsträger im Kanal geringer, so dass dort mehr Ladungsträger als Reservoir ausgebildet werden können.

[0025] Gemäß einer Ausführung weist die Ladungsträgerreservoirschiicht eine delta-förmige Ladungsträgerdichte auf. Dadurch kann die Ladungsträgerdichte in einem sehr schmalen Bereich mit hoher Konzentration untergebracht werden, wodurch eine geringe Ausdehnung bzw. eine geringe Dicke erreicht werden kann.

[0026] Gemäß einer Ausführung weist die Ladungsträgerreservoirschiicht eine konstante Ladungsträgerdichte auf. Dadurch kann beispielsweise ein gleichmäßiges Dotierverfahren verwendet werden, was die Herstellung vereinfacht.

[0027] Gemäß einer Ausführung weist der Feldeffekttransistor ferner ein Substrat sowie zweckmäßig eine Pufferschicht zwischen Substrat und unterer Halbleiterschicht auf. Die Pufferschicht kann insbesondere hochohmiger sein als die untere Halbleiterschicht. Insbesondere kann die Pufferschicht einen spezifischen Widerstand von mehr als $10^7 \Omega \text{ cm}$ aufweisen. Die Pufferschicht kann beispielsweise eine elektrische Isolierung zwischen den bereits erwähnten Halbleiterschichten und einem Substrat darstellen. Das Substrat kann beispielsweise ein Wafer oder ein sonstiger Untergrund sein, auf welchem die anderen Schichten, also insbesondere die Pufferschicht und die Halbleiterschichten, gewachsen oder auf sonstige Art aufgebracht werden.

[0028] Die zweite Bandlücke kann insbesondere größer sein als die erste Bandlücke. Dadurch kann in vorteilhafter Weise ein Kanal in der unteren Halbleiterschicht an der Grenzfläche zur oberen Halbleiterschicht ausgebildet werden.

[0029] Beispielsweise kann bei der Verwendung von Nitriden die zweite Bandlücke um mindestens 0,3 eV, bevorzugt um mindestens 0,5 eV größer sein als die erste Bandlücke. Beispielsweise kann hierzu als obere Halbleiterschicht Aluminiumgalliumnitrid (AlGaIn) oder Aluminiumindiumnitrid (AlInN) verwendet werden und als untere Halbleiterschicht kann hierzu beispielsweise Galliumnitrid (GaIn) verwendet werden.

[0030] Bei Verwendung von Galliumarsenid (GaAs) und anderen III-V-Halbleitersystemen kann die zweite Bandlücke bevorzugt mindestens 0,1 eV größer sein als die erste Bandlücke.

[0031] Bevorzugt ist in der unteren Halbleiterschicht der Ladungsträgerkanal an einer Grenzfläche zur oberen Halbleiterschicht ausgebildet. Dieser Ladungsträgerkanal ist gemäß einer typischen Ausführung im Grundzustand, d.h. bereits ohne angelegte Spannungen, vorhanden, so dass der Feldeffekttransistor dann typischerweise im Grundzustand eingeschaltet ist, also leitend ist. Die Ladungsträger des Ladungsträgerkanals können dabei insbesondere Elektronen oder Löcher sein.

[0032] Gemäß einer Ausführung weist die Ladungsträgerreservoirschicht die gleiche Ladung wie der Ladungsträgerkanal auf. Gemäß einer hierzu alternativen Ausführung weist die Ladungsträgerreservoirschicht Ladungsträger entgegengesetzter Ladung wie der Ladungsträgerkanal auf. Die Wahl der Ladungsträger kann insbesondere dazu führen, dass Ladungsträger der entsprechenden Polarität zur Verfügung stehen und dabei bei zu erwartenden Störstellen, beispielsweise aufgrund kosmischer Strahlung, diese Störstellen neutralisieren, so dass es nicht zu einer Verschiebung der Einsatzspannung oder zumindest nur zu einer geringfügigen Verschiebung kommt.

[0033] Gemäß einer bevorzugten Ausführung ist in der oberen Halbleiterschicht eine dotierte Schicht ausgebildet. Die dotierte Schicht kann beispielsweise einen Abstand von 1 nm bis 5 nm zur unteren Halbleiterschicht haben. Diese dotierte Schicht kann insbesondere zusätzliche Ladungsträger für den Ladungsträgerkanal bereitstellen und weist vorzugsweise die gleiche Polarität wie der Ladungsträgerkanal auf. Sie kann insbesondere als delta-dotierte Schicht, jedoch auch beispielsweise als räumlich dotierte Schicht ausgebildet sein.

[0034] Beispielsweise kann bei der Verwendung von Nitriden oder Oxiden als Halbleitermaterial die dotierte Schicht eine Dotierung von mindestens $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ bei räumlicher Dotierung und/oder von mindestens $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ bei delta-Dotierung haben. Bei Verwendung von Arseniden als Halbleitermaterial kann die dotierte Schicht insbesondere eine Dotierung von mehr als $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ bei delta-Dotierung haben. Derartige Werte haben sich für typische Anwendungsfälle als vorteilhaft erwiesen, da sie den Aufbau des Ladungsträgerkanals unterstützen und somit zu einer Verbesserung der elektrischen Eigenschaften des Feldeffekttransistors führen.

[0035] Die untere Halbleiterschicht kann bevorzugt ein binäres System sein. Insbesondere kommen hierfür Galliumnitrid (GaN), Galliumarsenid (GaAs), Indiumphosphid (InP) und Galliumoxid (Ga_2O_3) infrage. Derartige Materialsysteme haben sich für die Verwendung als untere Schicht als besonders vorteilhaft erwiesen. Die obere Schicht kann insbesondere ein ternäres System sein, kann jedoch auch ein binäres System sein.

[0036] Bei Verwendung von Galliumnitrid (GaN) als untere Schicht kann insbesondere die obere Schicht aus dem Aluminiumgalliumindiumnitrid-System (Al(Ga,In)N) gebildet werden.

[0037] Bei Verwendung von Galliumarsenid (GaAs) als untere Schicht kann die obere Schicht insbesondere aus dem Aluminiumgalliumarsenid-System

(AlGaAs) oder auch als binäres System aus reinem Aluminiumarsenid (AlAs) ausgebildet sein.

[0038] Bei Verwendung von Indiumphosphid (InP) als untere Schicht kann die obere Schicht insbesondere aus dem Aluminiumgalliumindiumarsenidphosphid-System (AlGaInAsP) oder aus Aluminiumindiumarsenid (AlInAs) ausgebildet sein.

[0039] Bei Verwendung von Galliumoxid (Ga_2O_3) als untere Schicht kann die obere Schicht insbesondere aus Aluminiumgalliumoxid (AlGaO) oder aus Aluminiumgalliumindiumoxid (AlGaInO) ausgebildet sein.

[0040] Die genannten Materialsysteme und insbesondere die genannten Kombinationen von Materialsystemen haben sich für typische Anwendungsfälle als vorteilhaft erwiesen. Dadurch können gute elektrische Eigenschaften eines Feldeffekttransistors realisiert werden, wobei durch die Wahl des Materialsystems diese Eigenschaften an den jeweiligen Verwendungszweck angepasst werden können.

[0041] Eine Grenzschicht zwischen oberer Halbleiterschicht und unterer Halbleiterschicht kann insbesondere eben sein. Beispielsweise kann die Grenzschicht flach ausgebildet sein. Dies ermöglicht einen einfachen Aufbau. Auch andere Ausführungen sind hier jedoch möglich.

[0042] Allgemein kann gesagt werden, dass ein verbessertes Transistorbauelement realisiert werden kann, bei dem sich die elektrischen Eigenschaften durch ionisierende Strahlung möglichst wenig ändern. Dies kann beispielsweise erzielt werden durch das Einbringen von Ladungsträgern in eine Schicht mit einem Abstand von beispielsweise 5 nm bis 50 nm von der Heterogrenzfläche des Bauelements, an der sich ein leitfähiger Kanal bildet, wobei die Dicke der an Ladungsträgern angereicherten Schicht beispielsweise zwischen 5 nm und 50 nm betragen kann.

[0043] Eine solche Schicht lässt sich auf verschiedene Arten ausführen. Beispielsweise kann sie als konstante Dotierung oder auch als gradierte Dotierung mit einer idealerweise ansteigenden Dotierung in der Tiefe ausgeführt sein, da dann eine etwaige Ladungsträgerstreuung der Ladungsträger im Kanal am besten unterdrückt werden kann. Ladungsträger lassen sich aber auch einbringen, indem beispielsweise eine weitere Heterostruktur in einem Abstand von beispielsweise 20 nm bis 50 nm zur ursprünglichen Heterogrenzfläche eingebracht wird und diese beispielsweise entweder aufgrund der Materialeigenschaften eine Ladungsträgeranhäufung an der Heterogrenzfläche erzeugt oder diese durch eine Dotierung im Heteromaterial unterhalb des Kanals erzeugt wird.

[0044] Eine Degradierung eines Feldeffekttransistors oder sonstigen Halbleiterbauelements durch ionisierende Strahlung basiert üblicherweise darauf, dass die ionisierende Strahlung Defekte im Material erzeugt, welche als Ladungsträgersenken wirken. Dadurch ändert sich die Lage des Fermi-Niveaus und dieses wird bei höheren Strahlendosen an diversen Störstellen gepinnt. Um dem entgegenzuwirken, können Ladungsträger eingebracht werden, welche diese Störstellen kompensieren. Dadurch kann, je nach Dotierungshöhe, die Einsatzspannung des Transistors über einen weiten Dosisbereich nahezu konstant gehalten werden, da im Idealfall das Fermi-Niveau durch diese eingebrachten Ladungsträger konstant bleibt. Zwar ändert sich die initiale Einsatzspannung durch diese Vorgehensweise gegebenenfalls zu höheren Spannungen, bleibt dann jedoch über einen weiten Dosisbereich konstant, was einen zuverlässigen Betrieb des Bauelements bzw. des Feldeffekttransistors ermöglicht.

[0045] Typischerweise ist bei der hier beschriebenen Ausführung nur ein kleiner Bereich nahe dem leitfähigen Kanal dotiert, und zwar mit einer deutlich höheren Konzentration. Wäre ein zu breiter Bereich dotiert, könnte dies je nach Ausführung zu einem höheren Sperrstrom bzw. einer zu hohen notwendigen Sperrspannung am Gate führen. Durch die lokale Dotierung in einem begrenzten Bereich wird eine zu starke Änderung der Einsatzspannung bei hohen Dosisleistungen unterbunden. Hier ist insbesondere eine in die Tiefe ansteigende Ladungsträgerdichte vorteilhaft, die jedoch vorzugsweise nur in einer insgesamt dünnen Schicht eingebracht wird, um die Transistorparameter, insbesondere die Einsatzspannung ohne Bestrahlung, nicht zu stark vom Wert ohne Dotierung abweichen zu lassen. Dabei liegt vorteilhaft die Konzentration dieser zusätzlich eingebrachten Ladungsträger niedriger als die der Kanalladungsträger und ist idealerweise nur so hoch, dass die zu erwartende Ladungsänderung aufgrund der Schädigung durch ionisierende Strahlung bei maximal 50 % liegt. Die hierin beschriebene Struktur ermöglicht beispielsweise bei Verwendung von Galliumnitrid (GaN)-basierten Heterostrukturen Betriebsdauern beispielsweise eines Satelliten im Van-Allen-Gürtel von mehreren Tausend Jahren ohne nennenswerte Beeinträchtigung der Schaltkreiseigenschaften. Es gibt extremere Bedingungen, insbesondere in sonnennahen Orbits, wo entsprechend hohe Strahlenschäden in kürzeren Zeiträumen auftreten. Hier ist es insbesondere vorteilhaft, wenn Gruppe-III-Nitride eingesetzt werden, da mit ihnen der Betrieb der Elektronik bei Temperaturen weit über 400 °C möglich ist. Auf diesem Material basierende Schaltkreise können also entsprechend für Langzeitmissionen und unter Extrembedingungen eingesetzt werden, wo andere Materialien wie Silizium oder Galliumarsenid (GaAs) relativ früh versagen würden. Aber auch bei letztgenannten Materialien sowie bei Gruppe-III-Oxiden

kann die hierin beschriebene Dotierung zu einer deutlichen Verlängerung der Schaltkreislebensdauer führen.

[0046] Besonders geeignet sind Halbleiter mit hoher Bindungsenergie, dies sind insbesondere Siliziumkarbid (SiC) und Diamant (C) bzw. Schichten enthaltend mindestens zwei der Elemente Silizium (Si), Germanium (Ge) oder Kohlenstoff (C) in einer Schicht oder von Gruppe-III-Nitriden oder von Gruppe-III-Oxiden. Insbesondere haben sich die Gruppe-III-Nitride, also binäre, ternäre und quaternäre Verbindungen, im System Aluminiumgalliumindiumnitrid (AlGaInN) in letzter Zeit in dieser Beziehung sehr bewährt und es deuten sich extreme Bauelementlebensdauern an, die einen jahrzehntelangen Einsatz im Weltraum ermöglichen. Ähnliches ist von den Gruppe-III-Oxiden wie Galliumoxid (Ga_2O_3), Aluminiumoxid (Al_2O_3) und Indiumoxid (In_2O_3) sowie deren Mischkristallen zu erwarten.

[0047] Nochmal anders ausgedrückt kann beispielsweise bei einem Feldeffekttransistor mit einem durch einen Gatekontakt steuerbaren leitfähigen Kanal an einer Heterogrenzfläche ein Einbringen von Ladungsträgern erfolgen, beispielsweise in einem Abstand von 5 nm bis 50 nm unterhalb der den leitfähigen Kanal ausbildenden Heterogrenzfläche. Das Einbringen von Ladungsträgern kann insbesondere mittels eines Dotanden erfolgen. Es kann auch durch eine ladungsträgererzeugende Heterostruktur erfolgen. Das Material der Bauelementschichten kann insbesondere mindestens zwei der Elemente Silizium, Germanium oder Kohlenstoff in einer Schicht oder von Gruppe-III-Nitriden oder von Gruppe-III-Oxiden enthalten.

[0048] Weitere Merkmale und Vorteile wird der Fachmann den nachfolgend mit Bezug auf die beigefügte Zeichnung beschriebenen Ausführungsbeispielen entnehmen. Dabei zeigen:

Fig. 1: einen Feldeffekttransistor gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel,

Fig. 2: einen Feldeffekttransistor gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel, und

Fig. 3: einen zum Feldeffekttransistor der **Fig. 2** zugehörigen Verlauf von Energiebändern.

[0049] Die in den **Fig. 1** und **Fig. 2** dargestellten Ausführungsbeispiele sind dabei im Wesentlichen derart zu verstehen, dass sie die räumliche Struktur von Schichten und anderen Komponenten angeben. Beispielhafte Materialien sind nachfolgend beschrieben.

[0050] **Fig. 1** zeigt einen Feldeffekttransistor **10** gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel der Erfindung. Dieser weist ein Substrat **100** auf, welches beispielsweise in Form eines Wafers ausgebildet sein kann, auf welchem die anderen dargestellten Schich-

ten gewachsen werden. Auf dem Substrat **100** befindet sich eine Pufferschicht **101**, die auch eine Abfolge von verschiedenen Schichten sein kann und idealerweise hochohmig ausgelegt ist. Über der Pufferschicht **101** ist eine untere Halbleiterschicht **102** eingebracht, welche insbesondere aus einem binären Verbindungshalbleitermaterial ausgebildet sein kann. Die Dicke der unteren Halbleiterschicht **102** beträgt vorzugsweise zwischen 50 nm und 200 nm. Die untere Halbleiterschicht **102** kann auch als Kanalschicht bezeichnet werden. Die untere Halbleiterschicht **102** hat eine erste Bandlücke.

[0051] Unmittelbar auf der unteren Halbleiterschicht **102** befindet sich eine obere Halbleiterschicht **103**, welche eine zweite Bandlücke hat, wobei die zweite Bandlücke größer ist als die erste Bandlücke. Hierzu kann beispielsweise ein geeignetes binäres oder ternäres Material als obere Halbleiterschicht **103** verwendet werden.

[0052] Zwischen der unteren Halbleiterschicht **102** und der oberen Halbleiterschicht **103** befindet sich eine Grenzfläche **111**, wobei unmittelbar unterhalb der Grenzfläche **111** in einem Grundzustand ein zweidimensionales Elektronengas ausgebildet ist, welches einen Ladungsträgerkanal **104** bildet. Dieser ist im Grundzustand vorhanden, so dass es sich hierbei um einen normalerweise eingeschalteten Feldeffekttransistor handelt. Beispielsweise entsteht der Ladungsträgerkanal **104** bei Gruppe-III-Nitriden unmittelbar an der Grenzfläche **111**, bei anderen Halbleitern wie zum Beispiel einem GaAs-AlGaAs-Heteroübergang kann insbesondere eine zusätzliche dotierte Schicht **105** eingebracht werden, welche mit einem Donator hochdotiert ist, um Elektronen an der Grenzfläche **111** zur Verfügung zu stellen und damit den Ladungsträgerkanal **104** auszubilden oder dessen Ausbildung zumindest zu unterstützen.

[0053] Über der oberen Halbleiterschicht **103** ist eine Deckschicht **106** ausgebildet, welche vorliegend aus einem Dielektrikum besteht. Darüber befinden sich ein Sourcekontakt **107**, ein Drainkontakt **108** sowie ein Gatekontakt **109**. Deckschicht **106** und Gatekontakt **109** bilden zusammen eine Gatestruktur. Der Sourcekontakt **107** und der Drainkontakt **108** sind elektrisch mit der unteren Halbleiterschicht **102** verbunden, so dass der Ladungsträgerkanal **104** damit an zwei Stellen kontaktiert werden kann. Der Gatekontakt **109** befindet sich lediglich oberhalb der Deckschicht **106**, so dass damit der Ladungsträgerkanal **104** durch Anlegen einer Spannung gezielt beeinflusst werden kann. Ist der Ladungsträgerkanal **104** beispielsweise aus Elektronen ausgebildet und wird an dem Gatekontakt **109** eine negative Spannung angelegt, so verarmt der Ladungsträgerkanal **104** und der Widerstand zwischen Sourcekontakt **107** und Drainkontakt **108** wird deutlich höher.

[0054] In der unteren Halbleiterschicht **102** ist zusätzlich eine Ladungsträgerreservoirschicht **110** ausgebildet. Diese ist in **Fig. 1** schraffiert eingezeichnet. Hierzu wurden zusätzliche Dotanden eingebracht, welche die Ladungsträgerreservoirschicht **110** ausbilden und deren Dichte mit zunehmendem Abstand von der Grenzfläche **111** zunimmt. Dies ist in einem separaten Diagramm in **Fig. 1** gezeigt, in welchem die Dotierdichte N in Abhängigkeit von der Höhe z des Bauelements angetragen ist. Wie gezeigt steigt die Dotierung von 10^{16} cm^{-3} am oberen Rand bis zu etwas über 10^{19} cm^{-3} am unteren Rand an.

[0055] Wird der Feldeffekttransistor **10** ionisierender Strahlung ausgesetzt, was beispielsweise beim Einsatz im Weltraum vorkommt, so entstehen typischerweise in der unteren Halbleiterschicht **102** und in der Pufferschicht **101** Störstellen, welche Elektronensenken bilden. Wäre die Ladungsträgerreservoirschicht **110** nicht vorhanden, so würden die zum Füllen dieser Störstellen benötigten Ladungsträger aus dem Ladungsträgerkanal **104** abgezogen werden und würden nicht mehr für die Leitung von elektrischem Strom zwischen dem Sourcekontakt **107** und dem Drainkontakt **108** zur Verfügung stehen. Dies würde zu einer signifikanten Änderung der Transistorcharakteristika führen.

[0056] Aufgrund des Vorhandenseins der Ladungsträgerreservoirschicht **110** werden die zum Füllen der Störstellen mit Ladungsträgern benötigten Ladungsträger primär aus der Ladungsträgerreservoirschicht **110** entnommen, was zu einer wesentlich geringeren oder auch nicht mehr wahrnehmbaren Veränderung der Transistorcharakteristika führt. Der Ladungsträgerkanal **104** bleibt trotz des Entstehens von Störstellen aufgrund ionisierender Strahlung im Wesentlichen identisch, so dass insgesamt die Resistenz des Feldeffekttransistors **10** gegen ionisierende Strahlung deutlich erhöht wird.

[0057] **Fig. 2** zeigt einen Feldeffekttransistor **10** gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel. Im Gegensatz zum ersten Ausführungsbeispiel ist dabei die Ladungsträgerreservoirschicht nicht durch Dotierung, sondern durch einen weiteren Halbleiterheteroübergang ausgebildet. Bezüglich der weiteren Komponenten sei auf **Fig. 1** und die zugehörige Beschreibung verwiesen.

[0058] Das gezeigte Materialsystem sowie die zugehörigen Bänder, nämlich Leitungsband E_c und Valenzband E_v , sowie die Fermienergie E_F , sind in **Fig. 3** dargestellt. Die untere Halbleiterschicht **102** ist dabei aus Galliumnitrid (GaN) ausgebildet. Die obere Halbleiterschicht **103** ist aus Aluminiumgalliumnitrid (AlGaIn) ausgebildet. In der unteren Halbleiterschicht **102** ist eine Ladungsträgerreservoirschicht **112** in Form einer darin befindlichen Schicht aus Indiumgalliumnitrid (InGaIn) ausgebildet. Entsprechend

dem in **Fig. 3** dargestellten Bandverlauf bildet sich somit ein zweidimensionales Elektronengas an der Grenzfläche **111** zwischen unterer Halbleiterschicht **102** und oberer Halbleiterschicht **103**. Des Weiteren bildet sich jedoch auch eine erhöhte Ladungsträgerdichte in der Ladungsträgerreservoirschicht **112**, da das Leitungsband E_c sich hier deutlich näher an der Fermienergie E_F befindet. Entsprechende Strukturen sind auch im Valenzband E_v ausgebildet, wie dies in **Fig. 3** dargestellt ist.

[0059] Aufgrund der wesentlich größeren Nähe des Leitungsbands E_c zur Fermienergie E_F in der Ladungsträgerreservoirschicht **112** liegt dort eine deutlich höhere Ladungsträgerdichte vor, welche die gleichen Effekte hat wie bereits mit Bezug auf die Ladungsträgerreservoirschicht **110** von **Fig. 1** beschrieben wurde. Auch in diesem Fall kann somit eine wesentlich höhere Resistenz gegen ionisierende Strahlung erreicht werden.

[0060] Es sei erwähnt, dass bei Ausbildung der Ladungsträgerreservoirschicht **112** aus Aluminiumgalliumnitrid (AlGaN) anstelle von Indiumgalliumnitrid (InGaN) auch eine Löcheranhäufung an der Grenzfläche zum Galliumnitrid (GaN) erreicht werden kann. Dies kann beispielsweise für einen strahlungsstabilisierten Anreicherungstyp-Transistor verwendet werden. Auch bei einer gemäß **Fig. 2** ausgebildeten Ladungsträgerreservoirschicht sind unterschiedliche Verläufe der Ladungsträgerdichte darin möglich, beispielsweise derart, wie dies anhand des Banddiagramms von **Fig. 3** nachvollzogen werden kann.

[0061] Bei beiden gezeigten Ausführungsbeispielen kann auch eine untere Ladungsträgeranhäufung aus dem entgegengesetzten Ladungsträgertyp gebildet werden, die für eine Verarmung des Bauelements ohne angelegte Spannung sorgt, also einen Anreicherungstyp-Transistor bewirkt. Vorzugsweise ist eine hierfür verwendete Dotierung tendenziell weiter vom Kanal **104** entfernt als bei gleichem eingebrachtem Ladungsträgertyp, also bei der oberen Grenze des angegebenen Bereichs. Insbesondere kann die Entfernung mindestens 50 nm oder mindestens 100 nm betragen. Auch hier kann bei einer ausreichend hohen Dotierkonzentration, die oberhalb der zu erwartenden Dotierung durch ionisierende Strahlung liegt, eine nennenswerte Veränderung der Einsatzspannung unterdrückt werden.

[0062] Als alternative Ausführung kann zur Entkopplung eine Schicht, beispielsweise mit einer Dicke zwischen 5 nm und 100 nm, mit einer größeren Bandlücke zwischen Dotierung und Kanal als Barriere verwendet werden. Dadurch kann beispielsweise der Mindestabstand mit dazwischenliegender Barrierschicht auf 20 nm verringert werden.

[0063] Vorzugsweise ist die Dotierung so gewählt, dass sie die entstehenden Strahlungsschäden kompensiert. Hierzu kann insbesondere bei der hauptsächlichlichen Ausbildung von tiefen Donatoren eine Löcherdotierung verwendet werden, und/oder bei der hauptsächlichlichen Ausbildung von tiefen Akzeptoren kann eine Elektronendotierung verwendet werden.

[0064] Als Deckschicht **106** kann alternativ beispielsweise sowohl Aluminiumgalliumnitrid (AlGaN) als auch Aluminiumindiumnitrid (AlInN) bzw. allgemein das Aluminiumgalliumindiumnitrid-Materialsystem (AlGalnN) dienen. Ebenso kann ein Dielektrikum verwendet werden, wie dies bereits beschrieben wurde. Die untere Halbleiterschicht **102** ist vorzugsweise so ausgebildet, dass sie eine hohe Ladungsträgermobilität ermöglicht, beispielsweise aus Galliumnitrid (GaN). Wird eine Heterostruktur für die Ladungsträgerreservoirschicht **112** verwendet, so kann diese insbesondere im System Aluminiumgalliumindiumnitrid (AlGalnN) gewählt werden. Alternativ zu den Nitriden gilt dasselbe auch für Oxide.

[0065] Insbesondere können die hierin offenbarten Ausführungen auf alle lateralen Transistorbauelemente angewandt werden, bei denen eine Schichtenfolge auf einem Substrat gewachsen wird und bei der der Stromfluss zumindest zum größten Teil parallel zur Oberfläche verläuft. Ionisierende Strahlung beinhaltet insbesondere Alpha-, Beta- und Gammastrahlung, sowie alle hochenergetischen Teilchen wie Elementarteilchen und schwerere Atome bzw. Ionen, die in Materie eindringen können und lokal Kristalldefekte verursachen oder sich als Fremdatome einlagern. Mit den hierin vorgestellten Mechanismen und insbesondere den eben beschriebenen Ausführungsbeispielen kann vorgebeugt werden, dass sich derartige Beschädigungen auf die elektrischen Charakteristika des Transistors auswirken.

[0066] Es sei darauf hingewiesen, dass in den Ansprüchen und in der Beschreibung Merkmale in Kombination beschrieben sein können, beispielsweise um das Verständnis zu erleichtern, obwohl diese auch separat voneinander verwendet werden können. Der Fachmann erkennt, dass solche Merkmale auch unabhängig voneinander mit anderen Merkmalen oder Merkmalskombinationen kombiniert werden können.

[0067] Rückbezüge in Unteransprüchen können bevorzugte Kombinationen der jeweiligen Merkmale kennzeichnen, schließen jedoch andere Merkmalskombinationen nicht aus.

Bezugszeichenliste

- 10:** Feldeffekttransistor
- 100:** Substrat
- 101:** Pufferschicht

- 102: untere Halbleiterschicht
- 103: obere Halbleiterschicht
- 104: Ladungsträgerkanal
- 105: zusätzliche dotierte Schicht
- 106: Deckschicht
- 107: Sourcekontakt
- 108: Drainkontakt
- 109: Gatekontakt
- 110: Ladungsträgerreservoirschicht
- 111: Grenzfläche
- 112: Ladungsträgerreservoirschicht

Patentansprüche

1. Feldeffekttransistor (10), aufweisend
 - eine untere Halbleiterschicht (102) mit einer ersten Bandlücke,
 - eine obere Halbleiterschicht (103) mit einer zweiten Bandlücke, welche unterschiedlich ist zur ersten Bandlücke, wobei die obere Halbleiterschicht (103) auf der unteren Halbleiterschicht (102) angeordnet ist,
 - einen Sourcekontakt (107), welcher die untere Halbleiterschicht (102) kontaktiert,
 - einen Drainkontakt (108), welcher die untere Halbleiterschicht (102) kontaktiert,
 - eine Gatestruktur (106, 109), welche auf der oberen Halbleiterschicht (103) angeordnet ist,
 - wobei unterhalb der oberen Halbleiterschicht (103) mit Abstand zur oberen Halbleiterschicht (103) eine Ladungsträgerreservoirschicht (110, 112) ausgebildet ist, welche im Vergleich zur Umgebung eine erhöhte Ladungsträgerdichte aufweist.
2. Feldeffekttransistor (10) nach Anspruch 1,
 - wobei die erhöhte Ladungsträgerdichte einen Wert von mindestens $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ oder von mindestens $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ und/oder von höchstens $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ aufweist.
3. Feldeffekttransistor (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
 - wobei der Abstand der Ladungsträgerreservoirschicht (110, 112) zur oberen Halbleiterschicht (103) 5 nm bis 50 nm beträgt.
4. Feldeffekttransistor (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
 - wobei die Ladungsträgerreservoirschicht (110, 112) eine Dicke zwischen 5 nm und 50 nm aufweist.
5. Feldeffekttransistor (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
 - wobei die Ladungsträgerreservoirschicht (110) durch Dotierung ausgebildet ist.

6. Feldeffekttransistor (10) nach Anspruch 5,

- wobei die Dotierung mit Silizium, Germanium, Schwefel, Selen und/oder Tellur ausgebildet ist.

7. Feldeffekttransistor (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

- wobei die Ladungsträgerreservoirschicht (112) durch einen Halbleiterheteroübergang ausgebildet ist.

8. Feldeffekttransistor (10) nach Anspruch 7,

- wobei der Halbleiterheteroübergang in einem Abstand von 20 nm bis 50 nm zur oberen Halbleiterschicht (103) angeordnet ist.

9. Feldeffekttransistor (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

- wobei die Ladungsträgerreservoirschicht (110, 112) eine mit zunehmendem Abstand von der oberen Halbleiterschicht (103) ansteigende Ladungsträgerdichte aufweist.

10. Feldeffekttransistor (10) nach einem der Ansprüche 1 bis 8,

- wobei die Ladungsträgerreservoirschicht (110, 112) eine delta-förmige Ladungsträgerdichte aufweist.

11. Feldeffekttransistor (10) nach einem der Ansprüche 1 bis 8,

- wobei die Ladungsträgerreservoirschicht (110, 112) eine konstante Ladungsträgerdichte aufweist.

12. Feldeffekttransistor (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

- welcher ferner ein Substrat (100) sowie eine Pufferschicht (101) zwischen Substrat (100) und unterer Halbleiterschicht (102) aufweist,
- wobei die Pufferschicht (101) hochohmiger ist als die untere Halbleiterschicht (102).

13. Feldeffekttransistor (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

- wobei in der unteren Halbleiterschicht (102) ein Ladungsträgerkanal (104) an einer Grenzfläche (111) zur oberen Halbleiterschicht (103) ausgebildet ist.

14. Feldeffekttransistor (10) nach Anspruch 13,

- wobei die Ladungsträgerreservoirschicht (110, 112) Ladungsträger gleicher Ladung wie der Ladungsträgerkanal (104) aufweist.

15. Feldeffekttransistor (10) nach Anspruch 13,

- wobei die Ladungsträgerreservoirschicht (110, 112) Ladungsträger entgegengesetzter Ladung wie der Ladungsträgerkanal (104) aufweist.

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

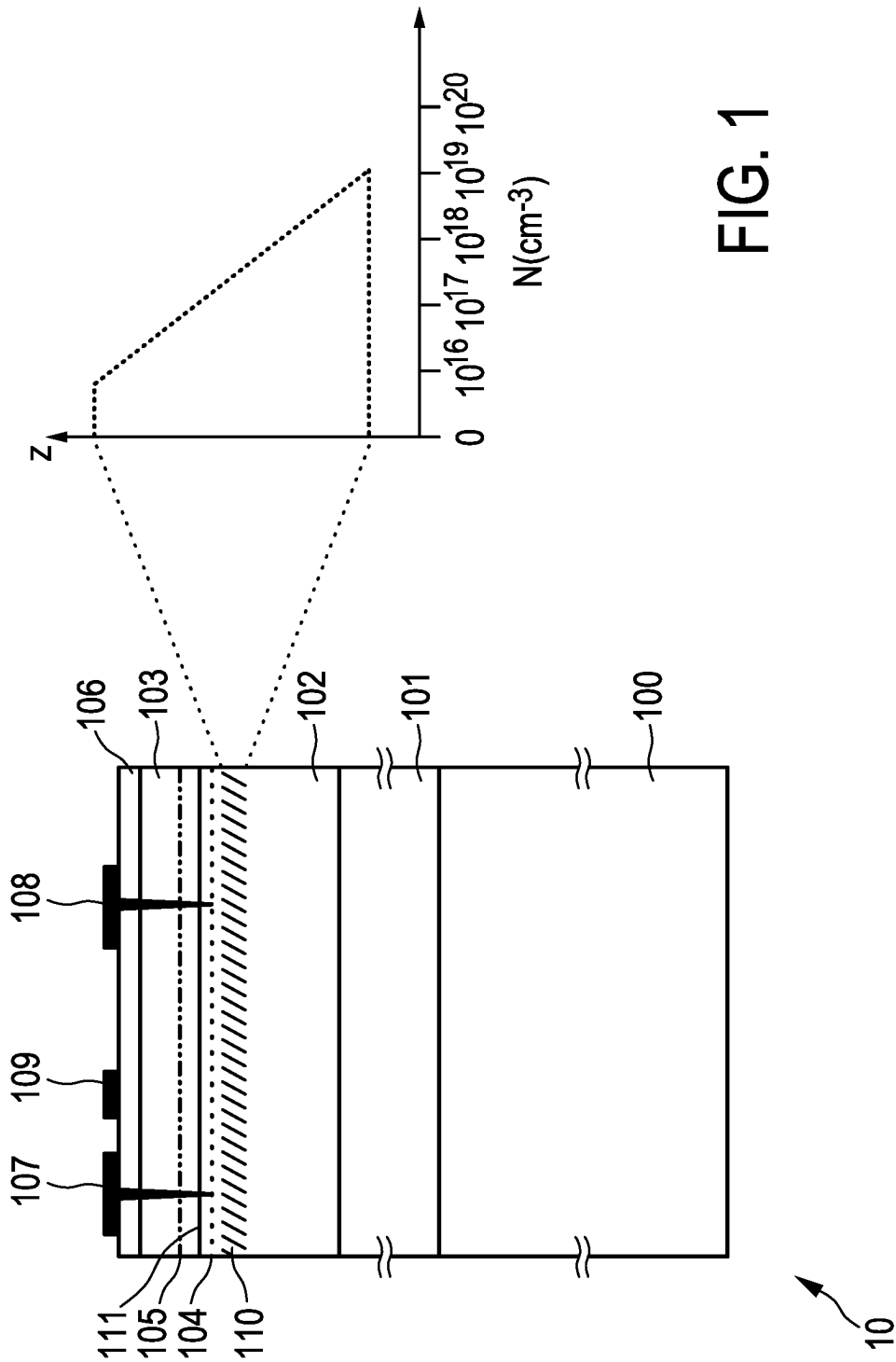


FIG. 1

