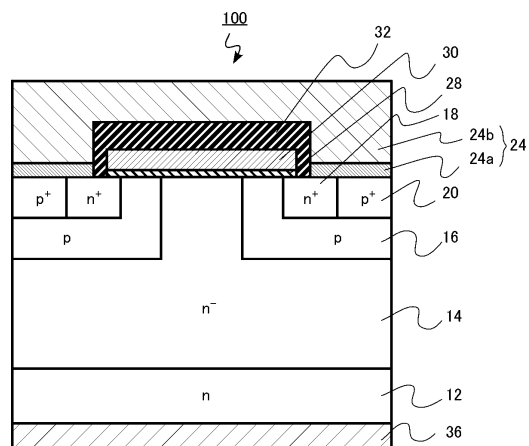




【特許請求の範囲】

【請求項 1】

p 型不純物と n 型不純物を含有し、前記 p 型不純物を元素 A、前記 n 型不純物を元素 D とする場合に、前記元素 A と前記元素 D との組み合わせが、Al（アルミニウム）、Ga（ガリウム）または In（インジウム）と N（窒素）、B（ボロン）と P（リン）の少なくとも一方の組み合わせであり、前記組み合わせを構成する前記元素 D の濃度の前記元素 A の濃度に対する比が 0.33 より大きく 1.0 より小さく、前記組み合わせを構成する前記元素 A の濃度が $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 以下である p 型 SiC 領域を備えることを特徴とする半導体装置。

【請求項 2】

10

第 1 と第 2 の面を有する SiC 基板と、

前記 SiC 基板の前記第 1 の面側に設けられた n 型の SiC 層と、

前記 SiC 層の表面に形成された p 型の第 1 の SiC 領域と、

前記第 1 の SiC 領域の表面に形成された n 型の第 2 の SiC 領域と、

前記第 1 の SiC 領域の表面に形成され、p 型不純物と n 型不純物を含有し、前記 p 型不純物を元素 A、前記 n 型不純物を元素 D とする場合に、前記元素 A と前記元素 D との組み合わせが、Al（アルミニウム）、Ga（ガリウム）または In（インジウム）と N（窒素）、B（ボロン）と P（リン）の少なくとも一方の組み合わせであり、前記組み合わせを構成する前記元素 D の濃度の前記元素 A の濃度に対する比が 0.33 より大きく 1.0 より小さく、前記組み合わせを構成する前記元素 A の濃度が $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 以下である p 型の第 3 の SiC 領域と、

20

前記 SiC 層、前記第 1 の SiC 領域の表面に連続的に形成されたゲート絶縁膜と、

前記ゲート絶縁膜上に形成されたゲート電極と、

前記第 2 の SiC 領域および前記第 3 の SiC 領域上に形成された第 1 の電極と、

前記 SiC 基板の前記第 2 の面側に形成された第 2 の電極と、

を備えることを特徴とする半導体装置。

【請求項 3】

第 1 と第 2 の面を有する n 型の SiC 基板と、

前記 SiC 基板の前記第 1 の面側に設けられた n 型の SiC 層と、

前記 SiC 層の表面に形成され、p 型不純物と n 型不純物を含有し、前記 p 型不純物を元素 A、前記 n 型不純物を元素 D とする場合に、前記元素 A と前記元素 D との組み合わせが、Al（アルミニウム）、Ga（ガリウム）または In（インジウム）と N（窒素）、B（ボロン）と P（リン）の少なくとも一方の組み合わせであり、前記組み合わせを構成する前記元素 D の濃度の前記元素 A の濃度に対する比が 0.33 より大きく 1.0 より小さく、前記組み合わせを構成する前記元素 A の濃度が $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 以下である p 型の SiC 領域と、

30

前記 SiC 領域上に形成された第 1 の電極と、

前記 SiC 基板の前記第 2 の面側に形成された第 2 の電極と、

を備えることを特徴とする半導体装置。

【請求項 4】

40

n 型の SiC 層と、

前記 SiC 層の表面に形成された p 型の第 1 の SiC 領域と、

前記第 1 の SiC 領域の表面に形成された n 型の第 2 の SiC 領域と、

前記 n 型の SiC 層の裏面側に形成され、p 型不純物と n 型不純物を含有し、前記 p 型不純物を元素 A、前記 n 型不純物を元素 D とする場合に、前記元素 A と前記元素 D との組み合わせが、Al（アルミニウム）、Ga（ガリウム）または In（インジウム）と N（窒素）、B（ボロン）と P（リン）の少なくとも一方の組み合わせであり、前記組み合わせを構成する前記元素 D の濃度の前記元素 A の濃度に対する比が 0.33 より大きく 1.0 より小さく、前記組み合わせを構成する前記元素 A の濃度が $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 以下である p 型の第 3 の SiC 領域と、

50

前記 S i C 層、前記第 1 の S i C 領域の表面に連続的に形成されたゲート絶縁膜と、
前記ゲート絶縁膜上に形成されたゲート電極と、
前記第 2 の S i C 領域上に形成された第 1 の電極と、
前記第 3 の S i C 領域側に形成された第 2 の電極と、
を備えることを特徴とする半導体装置。

【請求項 5】

前記元素 D の濃度の前記元素 A の濃度に対する比が、0.40 より大きく 0.95 より小さいことを特徴とする請求項 1 ないし請求項 4 いずれか一項記載の半導体装置。

【請求項 6】

前記元素 A のアクセプタ準位が 150 meV 以下であることを特徴とする請求項 1 ないし請求項 5 いずれか一項記載の半導体装置。

10

【請求項 7】

前記元素 D の 90% 以上が前記元素 A の最近接の格子位置にあることを特徴とする請求項 1 ないし請求項 6 いずれか一項記載の半導体装置。

【請求項 8】

S i C 中に p 型不純物と n 型不純物とをイオン注入して p 型 S i C 領域を形成する半導体装置の製造方法であって、

前記 p 型不純物を元素 A、前記 n 型不純物を元素 D とする場合に、前記元素 A と前記元素 D との組み合わせが、Al (アルミニウム)、Ga (ガリウム) または In (インジウム) と N (窒素)、B (ボロン) と P (リン) の少なくとも一方の組み合わせであり、前記組み合わせを構成する前記元素 D のドーズ量の前記元素 A のドーズ量に対する比が、0.33 より大きく 1.0 より小さく、

20

前記 n 型不純物をイオン注入する際のプロジェクトドレンジ (Rp) が、前記 p 型不純物をイオン注入する際のプロジェクトドレンジ (Rp) に対し 90% 以上 110% 以下の範囲にあり、

前記 p 型 S i C 領域の前記組み合わせを構成する前記元素 A の濃度を $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 以下とすることを特徴とする半導体装置の製造方法。

【請求項 9】

前記組み合わせを構成する前記元素 D のドーズ量の前記元素 A のドーズ量に対する比が、0.40 より大きく 0.95 より小さいことを特徴とする請求項 8 記載の半導体装置の製造方法。

30

【請求項 10】

前記 p 型不純物と前記 n 型不純物のイオン注入を、複数のプロジェクトドレンジ (Rp) で多段階に分割して行うことを特徴とする請求項 8 または請求項 9 記載の半導体装置の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明の実施形態は、半導体装置およびその製造方法に関する。

【背景技術】

40

【0002】

次世代のパワー半導体デバイス用の材料として S i C (炭化珪素) が期待されている。S i C は S i (シリコン) と比較して、バンドギャップが 3 倍、破壊電界強度が約 10 倍、および熱伝導率が約 3 倍と優れた物性を有する。この特性を活用すれば低損失かつ高温動作可能なパワー半導体デバイスを実現することができる。

【0003】

一方、S i C は、不純物の固溶限が低いことや、不純物の形成するバンドギャップ中の準位が深いことに起因して、p 型不純物領域または n 型不純物領域の抵抗を低くすることが困難である。

【先行技術文献】

50

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開2012-31014号公報

【特許文献2】特開2009-167047号公報

【特許文献3】特開2011-233919号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

本発明が解決しようとする課題は、p型不純物領域の抵抗を低減した半導体装置およびその製造方法を提供することにある。

10

【課題を解決するための手段】

【0006】

実施形態の半導体装置は、p型不純物とn型不純物を含有するp型SiCの不純物領域を備える。そして、p型不純物を元素A、n型不純物を元素Dとする場合に、元素Aと元素Dとの組み合わせが、Al（アルミニウム）、Ga（ガリウム）またはIn（インジウム）とN（窒素）、B（ボロン）とP（リン）の少なくとも一方の組み合わせであり、上記組み合わせを構成する元素Dの濃度の元素Aの濃度に対する比が0.33より大きく1.0より小さく、上記組み合わせを構成する元素Aの濃度が $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 以下である。

20

【図面の簡単な説明】

【0007】

【図1】第1の実施形態の半導体装置を示す模式断面図である。

【図2】共ドープの作用を説明する図である。

【図3】共ドープの作用を説明する図である。

【図4】共ドープの作用を説明する図である。

【図5】共ドープの作用を説明する図である。

【図6】共ドープの作用を説明する図である。

【図7】n型SiCの場合のAlとNの濃度とシート抵抗の関係を示す図である。

【図8】p型SiCの場合のNとAlの濃度とシート抵抗の関係を示す図である。

【図9】第1の実施形態の半導体装置の製造方法を示す工程フロー図である。

30

【図10】第1の実施形態の半導体装置の製造方法を示す模式断面図である。

【図11】第1の実施形態の半導体装置の製造方法を示す模式断面図である。

【図12】第1の実施形態の半導体装置の製造方法を示す模式断面図である。

【図13】第1の実施形態の半導体装置の製造方法を示す模式断面図である。

【図14】第1の実施形態の半導体装置の製造方法を示す模式断面図である。

【図15】第2の実施形態の半導体装置の製造方法を示す工程フロー図である。

【図16】第2の実施形態の半導体装置の製造方法を示す模式断面図である。

【図17】第3の実施形態の半導体装置を示す模式断面図である。

【図18】第4の実施形態の半導体装置を示す模式断面図である。

【図19】第4の実施形態の半導体装置の製造方法を示す工程フロー図である。

40

【図20】第4の実施形態の半導体装置の製造方法を示す模式断面図である。

【図21】第4の実施形態の半導体装置の製造方法を示す模式断面図である。

【図22】第4の実施形態の半導体装置の製造方法を示す模式断面図である。

【図23】第4の実施形態の半導体装置の製造方法を示す模式断面図である。

【図24】第4の実施形態の半導体装置の製造方法を示す模式断面図である。

【図25】第4の実施形態の半導体装置の製造方法を示す模式断面図である。

【発明を実施するための形態】

【0008】

以下、図面を参照しつつ本発明の実施形態を説明する。なお、以下の説明では、同一の部材等には同一の符号を付し、一度説明した部材等については適宜その説明を省略する。

50

【0009】

また、以下の説明において、 n^+ 、 n 、 n^- および、 p^+ 、 p 、 p^- の表記は、各導電型における不純物濃度の相対的な高低を表す。すなわち n^+ は n よりも n 型の不純物濃度が相対的に高く、 n^- は n よりも n 型の不純物濃度が相対的に低いことを示す。また、 p^+ は p よりも p 型の不純物濃度が相対的に高く、 p^- は p よりも p 型の不純物濃度が相対的に低いことを示す。なお、 n^+ 型、 n^- 型を単に n 型、 p^+ 型、 p^- 型を単に p 型と記載する場合もある。

【0010】

(第1の実施形態)

本実施形態の半導体装置は、第1と第2の面を有する n 型のSiC基板と、SiC基板の第1の面側に設けられた n 型のSiC層と、SiC層の表面に形成された p 型の第1のSiC領域と、第1のSiC領域の表面に形成された n 型の第2のSiC領域と、を備える。そして、第1のSiC領域の表面に形成され、 p 型不純物と n 型不純物を含有し、 p 型不純物を元素A、 n 型不純物を元素Dとする場合に、元素Aと元素Dとの組み合わせが、Al（アルミニウム）、Ga（ガリウム）またはIn（インジウム）とN（窒素）、B（ボロン）とP（リン）の少なくとも一方の組み合わせであり、上記組み合わせを構成する元素Dの濃度の元素Aの濃度に対する比（濃度D／濃度A）が0.33より大きく1.0より小さく、上記組み合わせを構成する元素Aの濃度が $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 以下である p 型の第3のSiC領域を備える。さらに、SiC層、第1のSiC領域の表面に連続的に形成されたゲート絶縁膜と、ゲート絶縁膜上に形成されたゲート電極と、第2のSiC領域および第3のSiC領域上に形成された第1の電極と、SiC基板の第2の面側に形成された第2の電極と、を備える。

【0011】

図1は、本実施形態の半導体装置であるMOSFETの構成を示す模式断面図である。このMOSFET（Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor）100は、例えば、 p ウェルとソース領域をイオン注入で形成する、Double Implantation MOSFET（DIMOSFET）である。

【0012】

このMOSFET 100は、第1と第2の面を備えるSiC基板（炭化珪素基板）12を備えている。図1においては、第1の面とは図の上側の面であり、第2の面とは図の下側の面である。このSiC基板12は、例えば、不純物濃度 $1 \times 10^{18} \sim 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 程度の、例えばN（窒素）を n 型不純物として含む4H-SiCのSiC基板（ n 基板）である。

【0013】

このSiC基板12の第1の面上には、例えば、 n 型不純物の不純物濃度 $5 \times 10^{15} \sim 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 程度の n 型のSiC層（ n^- -SiC層）14が形成されている。 n^- -SiC層14の膜厚は、例えば $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 程度である。

【0014】

n^- -SiC層14の一部表面には、 p 型不純物の不純物濃度 $5 \times 10^{15} \sim 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 程度の p 型の第1のSiC領域（ p ウェル領域）16が形成されている。 p ウェル領域16の深さは、例えば $0.6 \mu\text{m}$ 程度である。 p ウェル領域16は、MOSFET 100のチャンネル領域として機能する。

【0015】

第1のSiC領域（ p ウェル領域）16の一部表面には、例えば n 型不純物の不純物濃度 $1 \times 10^{18} \sim 1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 程度の n^+ 型の第2のSiC領域（ソース領域）18が形成されている。ソース領域18の深さは、第1のSiC領域（ p ウェル領域）16の深さよりも浅く、例えば $0.3 \mu\text{m}$ 程度である。

【0016】

また、第1のSiC領域（ p ウェル領域）16の一部表面であって、 n^+ 型の第2のS

i C 領域（ソース領域）18の側方に、例えばp型不純物の不純物濃度 $1 \times 10^{18} \sim 1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 程度のp⁺型の第3のSiC領域（pウェルコンタクト領域）20が形成されている。pウェルコンタクト領域20の深さは、第1のSiC領域（pウェル領域）16の深さよりも浅く、例えば0.3 μm程度である。

【0017】

p⁺型の第3のSiC領域（pウェルコンタクト領域）20は、p型不純物とn型不純物が共ドーピングされている。そして、p型不純物を元素A、n型不純物を元素Dとする場合に、元素Aと元素Dとの組み合わせが、Al（アルミニウム）、Ga（ガリウム）またはIn（インジウム）とN（窒素）との組み合わせ（第1の組み合わせ）、B（ボロン）とP（リン）との組み合わせ（第2の組み合わせ）の少なくとも一方の組み合わせであり、上記組み合わせを構成する元素Dの濃度の元素Aの濃度に対する比が0.33より大きく1.0より小さく、上記組み合わせを構成する元素Aの濃度が $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 以下である。

【0018】

例えば、Al（アルミニウム）、Ga（ガリウム）またはIn（インジウム）とN（窒素）の第1の組み合わせの場合、元素Aが、Al（アルミニウム）、Ga（ガリウム）またはIn（インジウム）から選ばれる1種の元素であってもかまわない。また、Al（元素A₁）とGa（元素A₂）等の2種の元素、あるいは、Al（元素A₁）、Ga（元素A₂）、In（元素A₃）の3種の元素で構成されていてもかまわない。複数の元素の場合、2種または3種の元素をあわせて組み合わせを構成する元素Aと考え、上記元素Dの濃度の元素Aの濃度に対する比、元素Aの濃度の条件が充足されれば良い。

【0019】

また、第1の組み合わせと第2の組み合わせの両者が共存することも可能である。しかし、上記元素Dの濃度の元素Aの濃度に対する比、元素Aの濃度の条件は、すくなくとも、第1の組み合わせ、第2の組み合わせのいずれか一方を構成する元素で充足されなければならない。いいかえれば、第1の組み合わせと第2の組み合わせは、個別に元素比、元素濃度を満たさなければならない。これは、第1の組み合わせの不純物と第2の組み合わせの不純物の間では、後に詳述する3量体が形成されないためである。

【0020】

例えば、Alが $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、Gaが $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、Nが $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の場合、 $N / (Al + Ga) = 0.5$ で、 $Al + Ga$ が $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ であるので元素比、濃度ともに実施形態の範囲内である。

【0021】

また、例えば、Bが $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、Pが $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、Nが $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の場合、第2の組み合わせであるBとPのみに着目する。すると、 $P / B = 0.25$ となり元素比を充足せず、実施形態の範囲外である。

【0022】

また、例えば、Alが $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、Bが $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、Nが $2.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、Pが $2.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の場合、第1の組み合わせで見ると、 $N / Al = 0.5$ で比の条件は満たすが、Alの濃度が $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 未満である。第2の組み合わせで見ると、 $P / B = 0.5$ で比の条件は満たすが、Bの濃度が $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 未満である。したがって、第1および第2の組み合わせがいずれも個別に元素比、元素濃度を充足しないので、実施形態の範囲外である。

【0023】

なお、本実施形態は、p型不純物やn型不純物として上記例示した以外の元素が含まれることを排除するものではない。以下、元素AがAl（アルミニウム）、元素DがN（窒素）である場合を例に説明する。

【0024】

n-SiC層14および第1のSiC領域（pウェル領域）16の表面に連続的に、これらの領域および層を跨ぐように形成されたゲート絶縁膜28を有している。ゲート絶縁

10

20

30

40

50

膜 28 には、例えば SiO_2 膜や high-k 絶縁膜が適用可能である。

【0025】

そして、ゲート絶縁膜 28 上には、ゲート電極 30 が形成されている。ゲート電極 30 には、例えばポリシリコン等が適用可能である。ゲート電極 30 上には、例えば、 SiO_2 膜で形成される層間絶縁膜 32 が形成されている。

【0026】

ゲート電極下の第 2 の SiC 領域（ソース領域）18 と n - SiC 層 14 とに挟まれる第 1 の SiC 領域 16 が MOSFET 100 のチャンネル領域として機能する。

【0027】

そして、第 2 の SiC 領域（ソース領域）18 と、第 3 の SiC 領域（p ウェルコンタクト領域）20 と電氣的に接続される導電性の第 1 の電極（ソース・p ウェル共通電極）24 を備えている。第 1 の電極（ソース・p ウェル共通電極）24 は、例えば、Ni（ニッケル）のバリアメタル層 24a と、バリアメタル層 24a 上の Al のメタル層 24b とで構成される。Ni のバリアメタル層 24a と Al のメタル層 24b とは反応により合金を形成していてもよい。

【0028】

また、 SiC 基板 12 の第 2 の面側には、導電性の第 2 の電極（ドレイン電極）36 が形成されている。第 2 の電極（ドレイン電極）36 は、例えば、Ni である。

【0029】

なお、本実施形態において、 n 型不純物は例えば、N（窒素）や P（リン）が好ましいが、As（ヒ素）等を適用することも可能である。また、 p 型不純物は例えば、Al（アルミニウム）が好ましいが、B（ボロン）、Ga（ガリウム）、In（インジウム）等を適用することも可能である。

【0030】

以下、本実施形態の作用および効果について詳述する。

【0031】

発明者らによる検討の結果、 SiC に対し、 p 型不純物（ p 型ドーパント）の Al と、 n 型不純物（ n 型ドーパント）の N とを共ドーブすることにより、Al と N のペアリングをおこさせることができることがわかった。このペアリング状態では、キャリアが補償され、キャリアがゼロの状態になる。

【0032】

図 2 および図 3 は、共ドーブの作用を説明する図である。図 2 が n 型 SiC の場合、図 3 が p 型 SiC の場合である。発明者らが行なった第一原理計算によれば、 SiC 中で、Al は Si（シリコン）サイトに、N は C（炭素）サイトに、Al と N が隣接するように入ることで、系として安定化することが明らかになった。

【0033】

すなわち、図 2 および図 3 に示すように、Al と N とが未結合でばらばらになっている状態に比べ、Al と N が結合し、Al-N ペア構造を形成することで、エネルギー的に 2.9 eV 安定になる。Al 量と N 量とが一致した場合には、両者の全てがペア構造になった状態が最も安定である。

【0034】

ここで、第一原理計算は、超ソフト擬ポテンシャルを用いた計算である。超ソフト擬ポテンシャルは、バンダービルトらによって開発された、擬ポテンシャルの一種である。例えば、格子定数は、1% 以下の誤差で実験値を実現できる高い精度を備える。不純物（ドーパント）を導入して、構造緩和を行い、安定状態の全エネルギーを計算する。系の全エネルギーを、変化の前後で比較することで、いずれの構造が安定状態か、否かを判定する。安定状態では、バンドギャップ中で不純物の準位が、どのエネルギー位置にあるかを示すことが出来る。

【0035】

図 2 に示すように、N が Al よりも多く存在する場合、すなわち、 n 型 SiC の場合、

10

20

30

40

50

余分にあるNが、Al-Nペア構造の近傍のCサイトに入り、N-Al-Nの3量体となることで更に系が安定化することが明らかになった。第一原理計算からは、3量体となることで、ペア構造とNとが別々に存在する場合に比べ、系が0.3 eV安定になる。

【0036】

同様に、図3に示すように、AlがNよりも多く存在する場合、すなわちp型SiCの場合、余分にあるAlが、Al-Nペア構造の近傍のSiサイトに入り、Al-N-Alの3量体となることで更に安定化することが明らかになった。第一原理計算からは、3量体となることで、Al-Nペア構造とAlとが別々に存在する場合に比べ、系が0.4 eV安定になる。

【0037】

次に、AlとN以外のドーパントの組み合わせについて、考察する。B（ボロン）とN（窒素）の場合について計算を行った場合を例に、計算結果を説明する。

【0038】

BはSiサイトに、NはCサイトに入る。第一原理計算によると、B-N-B、あるいは、N-B-Nという3量体構造は形成できないことがわかった。つまり、B-Nのペア構造は形成されるが、近傍にBやNが来ると系のエネルギーが高くなる。したがって、余分なBやNは、ペア構造から離れた位置に独立に存在する方が、系がエネルギー的に安定であった。

【0039】

第一原理計算によると、余分なBが3量体を形成すると、B-NペアとBが独立に存在する場合に比べて、系のエネルギーが0.5 eV高かった。また、余分なNが3量体を形成すると、B-NペアとNが独立に存在する場合に比べて、系のエネルギーが0.3 eV高かった。このため、いずれの場合も、3量体が出来ると系がエネルギー的に不安定になる。

【0040】

図4は、共ドーパの作用を説明する図である。図4では、各元素の共有結合半径を示す。図の右上方向に向かうほど共有結合半径が小さくなり、左下方に向かうほど共有結合半径が大きくなる。

【0041】

BとNの場合に、3量体が出来ると不安定になることは、共有結合半径の大きさにより理解できる。Bの共有結合半径はSiの共有結合半径より小さく、かつ、Nの共有結合半径はCの共有結合半径より小さい。このため、BがSiサイトに、NがCサイトに入ると、歪が溜まり3量体が形成できない。

【0042】

ドーパントとなるp型不純物とn型不純物の組み合わせとして、「共有結合半径がSiより大きな元素（Al、Ga、In）」と「共有結合半径がCより小さい元素（N）」の組み合わせ、あるいは、その逆の、「共有結合半径がCより大きな元素（B）」と「共有結合半径がSiより小さい元素（P）」の組み合わせの場合以外は、3量体が形成出来ないことが判明した。

【0043】

B、Pの共有結合半径はSiの共有結合半径とCの共有結合半径の間にあることから、B、およびPは、Siサイト、Cサイトのどちらにも入りえる。しかし、他の不純物（Al、Ga、In、N、As）は、基本的に片方のサイトに偏る。Al、Ga、In、AsはSiサイトに入り、NはCサイトに入ると考えて良い。

【0044】

さらに、両不純物が共にSiサイト、あるいは共にCサイトに入る場合は、考える必要がない。それは、p型不純物とn型不純物が最近接に来ないと歪が緩和し難いためである。よって、p型不純物を元素A、n型不純物を元素Dとする場合に、元素Aと元素Dとの組み合わせ（元素Aと元素D）が、（AlとN）、（GaとN）、（InとN）、（BとP）という4つの組み合わせ以外では、3量体を形成することは困難である。

10

20

30

40

50

【0045】

このペア構造、あるいは3量体構造は、原子間に相互作用が無ければ形成できない。第一原理計算による4H-SiC構造中の不純物準位（ドーパント準位）は、c軸方向にユニットセルが10個程度あると、相互作用が見えなくなり、不純物準位が平らな状態となる。すなわち、分散が十分に抑制され、10meVオーダー程度になる。

【0046】

つまり、不純物間の距離が10nm以上では相互作用が殆どないと考えられる。よって、不純物同士の相互作用があるためには、不純物濃度が $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上であることが望ましい。

【0047】

この値は、SiC材料が既に形成されている場合に、イオン注入などによって局所的な不純物の分布を形成する場合に望まれる不純物濃度の下限となる。

【0048】

なお、半導体SiCに、共ドーブによる効果が発現されるためには、n型不純物濃度とp型不純物濃度の比率を特定の範囲の比率にする必要がある。後に記述する製造方法において、イオン打ち込みによって導入するn型、p型のそれぞれの不純物の比率を上記特定の範囲の比率になるように、初めから導入することが重要である。相互作用が届く範囲が10nm未満と小さいが、その範囲にあれば、互いの引力により3量体が形成可能となる。しかも、引力が働くので、不純物の活性化アニールの温度が、共ドーブしない場合の1700℃-1900℃から、1500℃-1800℃に低温化できると考えられる。

【0049】

ただし、この3量体形成に望ましい不純物濃度は、CVD (Chemical Vapor Deposition) 法などによる気相からの結晶成長などでは、低減させることが可能である。これは、原料を表面にてフローさせることが出来るため、不純物同士の相互作用が低濃度でも生じやすくなるためである。

【0050】

気相成長では、三量体を形成可能な不純物濃度の領域が、 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 以下と、イオン注入に比較して拡大する。気相成長ではSiCの不純物濃度を、例えば、 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 程度と薄くすることも、例えば、 $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 程度と濃くすることも可能である。特に、濃度の薄い領域は、イオン注入による形成が困難である。したがって、特に濃度の薄い領域では、気相成長による不純物領域の形成が有効である。さらに、気相成長では、共ドーブされた、例えば、5nm程度の極薄膜を形成することも可能である。

【0051】

また、気相成長では不純物の濃度の濃い領域で、結晶中の欠陥が生じにくいという利点もある。すなわち、イオン注入では、導入する不純物量が大きくなるにつれ結晶中の欠陥量が増大し、熱処理等による回復も困難となる。気相成長では成長中に3量体が形成され、不純物導入による欠陥も生じにくい。この観点から、例えば、不純物濃度が $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上、さらには $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上の領域で、気相成長による不純物領域の形成が有効である。

【0052】

このように、気相成長では、イオン注入では得られない効果がある。もっとも、イオン注入では、局所的に共ドーブされた不純物領域を形成することが可能である。また、低コストで共ドーブされた不純物領域を形成することが可能である。よって、必要性に応じて、気相成長とイオン注入とを使い分ければ良い。

【0053】

気相からの結晶成長時において、3量体形成を形成する場合、p型およびn型の不純物濃度は $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上であることが望ましい。さらに、3量体形成を容易にする観点からは、不純物濃度は $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以上あることがより望ましい。

【0054】

次に不純物濃度の上限であるが、3量体を形成した場合には、3量体を形成しない場合の固溶限を超えることも可能である。3量体を作ると、結晶中の歪が緩和され不純物が固溶されやすくなるためである。

【0055】

3量体を形成しない場合の不純物の固溶限は、Nの場合は 10^{19} cm^{-3} オーダー、Alの場合でも 10^{21} cm^{-3} オーダーである。他の不純物は、およそ 10^{21} cm^{-3} オーダー程度である。

【0056】

不純物が一種類の場合、不純物の大きさが小さい側、あるいは大きい側に偏る。このため、歪が蓄積されて、不純物が格子点に入り難くなり、活性化できないためである。特にイオン注入では欠陥を多く形成するので、余計に固溶限が低くなる。

10

【0057】

しかし、3量体を形成すれば、Al、Nのどちらも 10^{22} cm^{-3} オーダー程度まで、導入が可能となる。(AlとN)、(GaとN)、(InとN)、(BとP)という4つの組み合わせにおいて、3量体を形成することで、歪を緩和することが出来るため、固溶限の拡大が可能となる。その結果、 10^{22} cm^{-3} オーダーまで不純物の固溶限の拡張が可能である。

【0058】

不純物がB、Al、Ga、In、Pである場合は、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上、特に、 $6 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上では、歪が多く、欠陥が多量に入っている状態となる。その結果、シート抵抗または比抵抗は非常に大きな値となる。

20

【0059】

しかし、p型不純物とn型不純物との共ドーピングによれば、このような不純物濃度の高い領域でも、欠陥が抑制できる。

【0060】

不純物がNである場合は、さらに固溶限が一桁小さく $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 程度である。第一原理計算によれば、不活性な格子間Nの欠陥が発生するためと考えられる。

【0061】

N濃度の上限が、 10^{19} cm^{-3} オーダーだったものが、3量体を形成することにより、 10^{22} cm^{-3} オーダーに大幅に拡大する。従来、高濃度にドーピングされたn型領域を形成する場合、窒素を使うことが出来ず、例えばPを 10^{20} cm^{-3} 程度、イオン注入することにより形成している。しかし、本実施形態を用いれば、例えば、Nを $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、Alを $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 導入するというように、窒素を用いて高濃度にドーピングされたn型領域を形成できる。つまり、従来は窒素を使うこと自体が困難だったが、それが可能になる。

30

【0062】

以上、p型不純物とn型不純物を両方とも導入し、かつ、共有結合半径の組み合わせを適切に選ぶことにより、上記の3量体を形成することが可能となる。そして、構造が安定化して、歪を低減することが出来る。

【0063】

その結果、(1) 各不純物が格子点に入りやすくなる。(2) プロセスの低温化が可能となる。少なくとも 100°C 程度の低温化は期待できる。(3) 活性化可能な不純物量(上限の拡大)が増加する。(4) 3量体、あるいはペア構造のような安定構造が出来る。この構造でエントロピーを稼ぎ、結晶欠陥量が低減する。(5) 3量体が安定なので、p型不純物とn型不純物を結ぶボンドの周りに回転することが難しくなり、構造が固定化する。したがって、通電破壊耐性が大幅にアップする。例えば、pnジャンクションのp型不純物領域、n型不純物領域の少なくとも一部に3量体構造を導入すれば、通電破壊が抑制され、高抵抗化が避けられる。その結果、電流を一定量だけ流すときに必要な印加電圧(Vf)が増加してしまう劣化現象(Vf劣化)を抑制可能となる。

40

【0064】

50

以上、p 型不純物の Al と n 型不純物の N を共ドーピングすることにより、Al と N のペ어링をおこさせることが出来ることを示した。さらに、この際、アクセプタ準位およびドナー準位を、ともに浅く出来ることが、第一原理計算により明らかになっている。

【0065】

図5、図6は、共ドーピングの作用の説明図である。図5はn型SiCの場合、図6はp型SiCの場合である。白丸は準位が電子で埋まっていない空の準位、黒丸は準位が電子で埋まっている状態を示す。

【0066】

ドナー準位が浅くなる理由は、図5に示すように、アクセプタであるAlの伝導帯の内側にある空の準位と、Nのドナー準位とが相互作用したことにより、ドナー準位が引き上げられたためである。同様に、アクセプタ準位が浅くなる理由は、図6に示すように、ドナーであるNの価電子帯の内側にある電子が埋った準位と、Alのアクセプタ準位とが相互作用したことにより、アクセプタ準位が引き下げられたためである。

【0067】

一般に、n 型不純物の N や P (リン) は $42\text{ meV} \sim 95\text{ meV}$ の深いドナー準位を形成する。p 型不純物の B、Al、Ga、In は $160\text{ meV} \sim 300\text{ meV}$ の非常に深いアクセプタ準位を形成する。それに対し、3 量体を形成すると、n 型不純物では 35 meV 以下のドナー準位を形成し、p 型不純物では、 100 meV 以下のアクセプタ準位を形成することが可能となる。

【0068】

3 量体が完全に形成された最良の状態では、n 型の N や P では、およそ 20 meV 程度となり、p 型の B、Al、Ga、In では 40 meV 程度となる。このように浅い準位を形成するので、活性化した不純物の多くがキャリア（自由電子、自由正孔）となる。したがって、バルク抵抗が共ドーピングを行わない場合に比べ、桁違いに低抵抗化する。

【0069】

n 型 SiC の場合、キャリア発生に寄与するドナー準位が 40 meV 以下となることで、共ドーピングしない場合と比較して、抵抗が低減する。また、 35 meV 以下となることで抵抗が約一桁、 20 meV 以下とすることにより抵抗が約二桁低減する。但し、歪緩和効果、ドーピング上限拡大効果なども含む。

【0070】

p 型 SiC の場合、キャリア発生に寄与するアクセプタ準位が 150 meV 以下となることで、共ドーピングしない場合と比較して、抵抗が低減する。また、 100 meV 以下となることで抵抗が約一桁、 40 meV 以下とすることにより抵抗が約二桁低減する。但し、歪緩和効果、ドーピング上限拡大効果なども含む。

【0071】

Al 濃度と N 濃度とが一致した場合 ($N : Al = 1 : 1$) には、浅い準位はあっても、キャリアが無い場合、絶縁体になってしまう。Al 濃度と N 濃度の差分だけキャリアが存在することになる。低抵抗の半導体になるには、濃度差が必要となる。

【0072】

N 濃度が Al 濃度よりも多い場合 ($N \text{ 濃度} > Al \text{ 濃度}$)、相互作用により Al-N ペアが出来た余りの N もまた、Al-N ペアの近傍の C を置換することで安定化する。このため、浅いドナー準位が形成される。また、歪も緩和するので、3 量体を形成しない場合よりも N の濃度を増やすことが出来る。

【0073】

図7は、n 型 SiC の場合の Al と N の濃度とシート抵抗の関係を示す図である。N 濃度は、 $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ としている。単体で N を導入した場合は、 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上いれても、シート抵抗は低減できない。その値がおよそ $300 \Omega / \square$ である。

【0074】

N 濃度 : Al 濃度が $1 : 1$ から $2 : 1$ になるまでは、歪が入らずに 3 量体ができ、浅いドナー準位に入っているキャリア電子数が増加する。したがって、シート抵抗が急激に低

10

20

30

40

50

下する。

【0075】

そして、2 : 1 に達したとき、最大量のキャリアが使えるので、最もシート抵抗が低い状態となる。シート抵抗は、図7に示すように、 $1.5 \Omega / \square$ 程度まで低減できる。n型SiCへのコンタクト抵抗も、N濃度 : Al濃度 = 2 : 1 になるようにし、N濃度とAl濃度の差分を 10^{20} cm^{-3} から 10^{22} cm^{-3} と増やすことで、 $10^{-5} \Omega \text{ cm}^3$ 程度から、 $10^{-7} \Omega \text{ cm}^3$ 程度まで低減可能である。

【0076】

さらに、2 : 1 よりN濃度の割合が上がると、N濃度 : Al濃度 = 2 : 1 より過剰なNにより、元の深いドナー準位が形成されることになる。そして、このドナー準位がキャリア電子を受け取ることになり、3量体によって形成された浅いドナー準位が空になってしまう。N濃度 : Al濃度 = 2 : 1 よりずれた分のNは、単体で導入された場合に近いので、歪の緩和が困難である。したがって、図7に示すように、シート抵抗が急激に増加していくことになる。

【0077】

図7では、n型不純物のN（窒素）を、Alを共ドーブしない場合に固溶限近傍まで入れた場合のシート抵抗（この場合は約 $300 \Omega / \square$ ）を比較対象とし、N濃度 : Al濃度 = 2 : 1 からずらした場合にどのようにシート抵抗の値が変化するかを示している。

【0078】

3量体構造が出来たAl濃度 / N濃度 = 0.5 を中心に考えることにする。Al濃度 / N濃度を 0.47 以上、0.60 ($8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上のキャリアが100%自由キャリアとなる) 以下とした場合、つまり、n型不純物に対し、p型不純物を47%~60%入れた場合、Alを共ドーブしない場合のシート抵抗に比較して2桁落ちのシート抵抗となり、非常に有効である。0.5未満では、浅い準位が減少し、かつ、歪が入るので、自由キャリア数が減り、0.47程度で、 $8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 相当のキャリアとなる。

【0079】

そこから幅を両側に広げて、Al濃度 / N濃度を 0.45 以上、0.75 ($5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上のキャリアが100%自由キャリアとなる) 以下とした場合、すなわち、AlをNに対し45%~75%入れた場合、2桁落ちからその3倍程度の大きさとなる。0.5未満では、浅い準位が減少し、かつ、歪が入るので、自由キャリア数が減り、0.45程度で、 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 相当のキャリアとなる。さらに幅を両側に広げて、Al濃度 / N濃度を 0.40 より大きく 0.95 ($1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上のキャリアが100%自由キャリアとなる) より小さくした場合、すなわち、AlをNに対し40%~95%入れた場合、1桁落ちのシート抵抗となる。0.5未満では、浅い準位が減少し、かつ、歪が入るので、自由キャリア数が減り、0.40程度で、 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 相当のキャリアとなる。

【0080】

AlをNに対し50%以上入れた側の方が特性がよいのは、歪が十分に緩和するためである。1つのAlに対し2つのNがクラスター化して3量体が形成された状態が50%の状態である。50%未満の場合、3量体が出来た状態に加え、更に余分なNが存在することになる。つまり、3量体になれないNがあるので、その分だけ歪が溜まることになる。3量体になれないNは、単体で入ったのも同然であり、直ぐに歪の限界に達してしまう。こうして、Alの量が50%を割った場合は、歪が急激に発生して、格子欠陥が増加することになる。このため、歪が緩和できる50%以上の場合に比較して、50%未満の方が、シート抵抗が急激に悪化する。

【0081】

なお、Al濃度 / N濃度 = 0.995 で、キャリア数が共ドーブしない場合とほぼ同等になる。 $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の0.5%分の $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上のキャリアが100%自由キャリアとなるので、従来の窒素ドーブのシート抵抗が実現可能となる。この

ため、シート抵抗が共ドーピングしない場合と、およそ一致することになる。また、 $A1$ 濃度/ N 濃度 $=0.33$ 、すなわち、 N 濃度： $A1$ 濃度 $=3:1$ の場合、キャリア電子がすべて、 3 量体によって形成される浅いドナー準位ではなく、余剰の N で形成される深いドナー準位に受け取られことになる。このため、シート抵抗が共ドーピングしない場合と、およそ一致することになる。したがって、共ドーピングにより抵抗が低減するのは、 $A1$ 濃度/ N 濃度を 0.33 より大きく 0.995 より小さくした場合、すなわち、 $A1$ を N に対し $33\% \sim 99.5\%$ 入れた場合となる。誤差も考えると、 33% より大きく、 100% 未満と考えればよい。

【0082】

$A1$ 濃度が N 濃度よりも多い場合（ $A1$ 濃度 $>N$ 濃度）、相互作用により $A1-N$ ペアが出来た余りの $A1$ もまた、 $A1-N$ ペアの近傍の Si を置換することで安定化する。このため、浅いアクセプタ準位が形成される。また、歪も緩和するので、 3 量体を形成しない場合よりも $A1$ の濃度を増やすことが出来る。この場合も、 N 濃度 $>A1$ 濃度の場合と同様に考えればよい。

【0083】

図8は、 p 型 SiC の場合の N と $A1$ の濃度とシート抵抗の関係を示す図である。 $A1$ 濃度は、 $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ としている。

【0084】

$A1$ 濃度： N 濃度が $1:1$ から $2:1$ になるまでは、歪が入らずに 3 量体ができ、浅いアクセプタ準位に入っているキャリア正孔数が増加する。したがって、シート抵抗が低下する。

【0085】

そして、 $2:1$ に達したとき、最大量のキャリアが使えるので、最もシート抵抗が低い状態となる。シート抵抗としては、図8に示すように、 $40 \Omega/\square$ 程度まで低減できる。 p 型 SiC へのコンタクト抵抗も、 $A1$ 濃度： N 濃度 $=2:1$ になるようにし、 $A1$ 濃度と N 濃度の差分を 10^{20} cm^{-3} から 10^{22} cm^{-3} と増やすことで $10^{-5} \Omega \text{ cm}^3$ 程度から、 $10^{-7} \Omega \text{ cm}^3$ 程度まで低減可能である。

【0086】

さらに、 $2:1$ より $A1$ 濃度の割合が上がると、 $A1$ 濃度： N 濃度 $=2:1$ より過剰な $A1$ により、元の深いアクセプタ準位が形成されることになる。そして、このアクセプタ準位がキャリア正孔を受け取ることになり、 3 量体によって形成された浅いアクセプタ準位が電子で埋まってしまう。 $A1$ 濃度： N 濃度 $=2:1$ よりずれた分の $A1$ は、単体で導入された場合に近いので、歪の緩和が困難である。したがって、図8に示すように、シート抵抗が急激に増加していくことになる。

【0087】

図8では、 p 型不純物の $A1$ （アルミニウム）を、 N を共ドーピングしない場合に固溶限近傍まで入れた場合のシート抵抗（この場合は約 $10 \text{ K}\Omega/\square$ ）を比較対象とし、 $A1$ 濃度： N 濃度 $=2:1$ からずらした場合にどのようにシート抵抗の値が変化するかを示している。

【0088】

3 量体構造が出来た N 濃度/ $A1$ 濃度 $=0.5$ を中心に考えることにする。 N 濃度/ $A1$ 濃度を 0.47 以上、 0.60 （ $8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上のキャリアが 100% 自由キャリアとなる）以下とした場合、つまり、 p 型不純物に対し、 n 型不純物を $47\% \sim 60\%$ 入れた場合、 N を共ドーピングしない場合のシート抵抗に比較して 2 桁落ちのシート抵抗となり、非常に有効である。 0.5 未満では、浅い準位が減少し、かつ、歪が入るので、自由キャリア数が減り、 0.47 程度で、 $8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 相当のキャリアとなる。

【0089】

そこから幅を両側に広げて、 N 濃度/ $A1$ 濃度を 0.45 以上、 0.75 （ $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上のキャリアが 100% 自由キャリアとなる）以下とした場合、すなわち、 N を $A1$ に対し $45\% \sim 75\%$ 入れた場合、 2 桁落ちからその 3 倍程度の大きさとなる。

0.5未満では、浅い準位が減少し、かつ、歪が入るので、自由キャリア数が減り、0.45程度で、 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 相当のキャリアとなる。さらに幅を広げて、N濃度/A1濃度を0.40より大きく0.95 ($1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上のキャリアが100%自由キャリアとなる)より小さくした場合、すなわち、NをA1に対し40%~95%入れた場合、1桁落ちのシート抵抗となる。0.5未満では、浅い準位が減少し、かつ、歪が入るので、自由キャリア数が減り、0.40程度で、 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 相当のキャリアとなる。

【0090】

NをA1に対して50%以上入れた側の方が特性がよいのは、歪が緩和するためである。それに対し、Nが50%未満の場合、1つのNに対し2つのA1がクラスター化して3量体が形成された状態が50%の状態であり、そこに更にA1が存在することになる。つまり、3量体になれないA1があるので、その分だけ歪が溜まることになる。こうして、50%を割った場合は、歪が急激に発生して、格子欠陥が増加することになる。このため、歪が緩和できる50%以上の場合に比較して、50%未満の場合の方が、シート抵抗が急激に悪化する。

【0091】

なお、N濃度/A1濃度=0.995で、キャリア数が共ドープしない場合とほぼ同等になる。 $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の0.5%分の $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上のキャリアが100%自由キャリアとなるので、従来のA1ドープのシート抵抗が実現可能となる。このため、シート抵抗が共ドープしない場合と、およそ一致することになる。また、N濃度/A1濃度=0.33、すなわちA1濃度:N濃度=3:1の場合、キャリア正孔がすべて、3量体によって形成される浅いアクセプタ準位ではなく、余剰のA1で形成される深いアクセプタ準位に受け取られことになる。このため、シート抵抗が共ドープしない場合と、およそ一致することになる。したがって、共ドープの抵抗低減効果が得られるのは、N濃度/A1濃度を0.33より大きく0.995より小さくした場合、すなわち、NをA1に対し33%~99.5%入れた場合となる。誤差も考えると、33%より大きく、100%未満と考えればよい。

【0092】

共ドープしない場合には、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以下の低濃度の不純物を使った低抵抗SiC半導体材料は存在し難い。しかし、共ドープによれば、3量体を形成することで、浅い準位が形成され、キャリア数が増加する。したがって、少量の不純物でも低抵抗化が可能である。

【0093】

以上のように、p型不純物とn型不純物を適切な割合で共ドープすることにより、少なくとも2つの顕著な効果が得られることになる。

【0094】

第一に、歪が緩和して、歪の少ないSiCを形成可能である。共ドープしない場合に比べて、歪が少なくなり、欠陥が少なく、多くの不純物を導入することが可能になる。すなわち、不純物の固溶限を高くすることができる。したがって、シート抵抗が低減し、比抵抗が低減し、コンタクト抵抗が低減する。イオン注入法であれ、エピタキシャル成長法であれ、欠陥が少なくなるので、不純物の高ドーズ化が可能となる。

【0095】

第二に、浅い準位を形成することが可能となる。共ドープしない場合と比較して、少ない不純物を用いるだけで、低抵抗な材料を作成することが可能になる。あるいは、同じ不純物量の場合に、桁違いに小さいシート抵抗が得られることになる。エピタキシャル成長にて形成可能な低ドーズの領域を考えた時、共ドープを用いない場合、高抵抗になってしまう。しかし、共ドープを使えば、低抵抗なSiCを形成することが可能となる。これにより、より低オン抵抗のSiC半導体装置を製造することも可能となる。

【0096】

本実施形態のMOSFET100ではp⁺型の第3のSiC領域(pウェルコンタクト

10

20

30

40

50

領域) 20に、p型不純物、例えばA1と、n型不純物、例えばNが共ドーピングされている。これにより、p⁺型の第3のSiC領域20のシート抵抗および比抵抗が低減される。また、第3のSiC領域20と、第1の電極24との間のコンタクト抵抗が低減される。したがって、pウェル電位(チャネル電位)が安定し、高性能なMOSFET100が実現される。

【0097】

また、3量体が形成されていることにより、結晶構造が安定して結晶欠陥が低減し、リーク電流が低減されたMOSFET100が実現される。さらに、結晶構造が安定して通電破壊耐性に優れたMOSFET100が実現される。特に、MOSFET100に組み込まれたボディダイオードは、通電劣化に対して高信頼なものとなる。

10

【0098】

通電劣化として、3C構造の結晶欠陥が発生し高抵抗化するモードがある。本実施形態の共ドーピング構造があれば、結晶が安定であるため、このモードが発現しない。したがって、高抵抗化モードの発現しない高信頼なボディダイオードが形成できる。

【0099】

第3のSiC領域20に含有されるp型不純物の濃度は、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 以下である。この範囲を下回ると、特にイオン注入で共ドーピングを行う場合に、p型不純物とn型不純物との相互作用が生じにくく、3量体が形成されないおそれがあるからである。また、この範囲を超えてp型不純物を固溶させることは困難だからである。

20

【0100】

第3のSiC領域20のシート抵抗または比抵抗と、第3のSiC領域20と第1の電極24との間のコンタクト抵抗とを十分低減し、pウェル電位の十分な安定を実現させる観点から、第3のSiC領域20に含有されるp型不純物の濃度は、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上であることがより望ましい。

【0101】

第3のSiC領域20のp型不純物を元素A、n型不純物を元素Dとする場合に、第3のSiC領域20のシート抵抗または比抵抗と、第3のSiC領域20と第1の電極24との間のコンタクト抵抗とを十分低減し、pウェル電位の十分な安定を実現させる観点から、元素Dの濃度の元素Aの濃度に対する比は、0.33より大きく1.0より小さい。また、元素Dの濃度の元素Aの濃度に対する比が、0.40より大きく0.95より小さいことが望ましい。また、0.45以上0.75以下であることがより望ましい。さらに、0.47以上0.60以下であることが一層望ましい。

30

【0102】

元素Dの濃度の元素Aの濃度に対する比は、例えば、SIMS(Secondary Ion Microprobe Spectrometry)により、元素A、元素Dそれぞれの濃度を求めることで算出可能である。

【0103】

第3のSiC領域20のp型不純物を元素A、n型不純物を元素Dとする場合に、シート抵抗または比抵抗を低減する観点から、元素Aのキャリア発生に寄与するアクセプタ準位が150meV以下であることが望ましい。また、100meV以下であることがより望ましく、40meV以下であることが一層望ましい。

40

【0104】

元素Aのアクセプタ準位は、例えば、第3のSiC領域20のシート抵抗または比抵抗、あるいは第3のSiC領域20と第1の電極24との間のコンタクト抵抗の活性化エネルギーを測定することで求めることが可能である。

【0105】

第3のSiC領域20のシート抵抗または比抵抗と、第3のSiC領域20と第1の電極24との間のコンタクト抵抗とを十分低減しpウェル電位の十分な安定を実現させる観点から、p型不純物とn型不純物の大部分が3量体を形成することが望ましい。したがっ

50

て、元素Dの90%以上が元素Aの最近接の格子位置にあることが望ましい。元素Dの90%以上が元素Aの最近接の格子位置にあれば、p型不純物とn型不純物の大部分(3量体を形成し得るうちの90%以上)が3量体を形成しているとみなすことができる。

【0106】

元素Dのうち、元素Aの最近接の格子位置にある元素の割合は、例えば、XPS(X-ray Photoelectron Spectroscopy)で、元素Aと元素Dとの結合状態を分析することにより求めることが可能である。

【0107】

次に、本実施形態の半導体装置の製造方法について説明する。

【0108】

本実施形態の半導体装置の製造方法は、SiC中にp型不純物とn型不純物とをイオン注入してp型SiC領域を形成する。そして、p型不純物を元素A、n型不純物を元素Dとする場合に、元素Aと元素Dとの組み合わせが、Al(アルミニウム)、Ga(ガリウム)またはIn(インジウム)とN(窒素)、B(ボロン)とP(リン)の少なくとも一方の組み合わせである。そして、上記組み合わせを構成する元素Dのドーズ量の元素Aのドーズ量に対する比が、0.33より大きく1.0より小さい。また、n型不純物をイオン注入する際のプロジェクトドレンジ(Rp)が、p型不純物をイオン注入する際のプロジェクトドレンジ(Rp)に対し90%以上110%以下の範囲にある。さらに、p型SiC領域の上記組み合わせを構成する元素Aの濃度を $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 以下とする。

【0109】

図9は、本実施形態の半導体装置の製造方法を例示する工程フロー図である。図10～図14は、本実施形態の半導体装置の製造方法を示す模式断面図である。

【0110】

図9に示すように、半導体装置の製造方法は、n⁻SiC層形成(ステップS100)、p型不純物イオン注入(ステップS102)、n型不純物イオン注入(ステップS104)、p型不純物イオン注入(ステップS106)、n型不純物イオン注入(ステップS108)、アニール(ステップS110)、ゲート絶縁膜形成(ステップS112)、ゲート電極形成(ステップS114)、層間膜形成(ステップS116)、第1の電極形成(ステップS118)、第2の電極形成(ステップS120)およびアニール(ステップS122)を備える。

【0111】

まず、n型不純物としてP(リン)またはN(窒素)を不純物濃度 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 程度含み、例えば、厚さ300μmであり、4H-SiCの低抵抗のn型のSiC基板12を準備する。

【0112】

ステップS100では、SiC基板12の一方の面上にエピタキシャル成長法により、n型不純物として、例えばNを不純物濃度 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 程度含み、厚さが10μm程度の高抵抗のn⁻SiC層14をエピタキシャル成長させる。

【0113】

その後、フォトリソグラフィーとエッチングによるパターニングにより、例えばSiO₂の第1のマスク材42を形成する。ステップS102では、この第1のマスク材42をイオン注入マスクとして用いて、p型不純物であるAlをn⁻SiC層14にイオン注入し、第1のSiC領域(pウェル領域)16を形成する(図10)。

【0114】

その後、フォトリソグラフィーとエッチングによるパターニングにより、例えばSiO₂の第2のマスク材44を形成する。ステップS104では、この第2のマスク材44をイオン注入マスクとして用いて、n型不純物であるNをn⁻SiC層14にイオン注入し、第2のSiC領域(ソース領域)18を形成する(図11)。

【0115】

その後、フォトリソグラフィーとエッチングによるパターンニングにより、例えば SiO_2 の第3のマスク材46を形成する。ステップS106では、この第3のマスク材46をイオン注入マスクとして用いて、p型不純物であるAlをn-SiC層14にイオン注入し、第3のSiC領域（pウェルコンタクト領域）20を形成する（図12）。

【0116】

さらに、ステップS108では、同じ第3のマスク材46をイオン注入マスクとして用いて、pウェルコンタクト領域20にn型不純物であるNをイオン注入する（図13）。

【0117】

このように、ステップS106とステップS108で、p型不純物とn型不純物とをイオン注入により共ドーピングしてpウェルコンタクト領域20を形成する。ここでは、p型不純物としてAl、n型不純物としてNを例示したが、p型不純物を元素A、n型不純物を元素Dとする場合に、元素Aと元素Dとの組み合わせが、Al（アルミニウム）、Ga（ガリウム）またはIn（インジウム）とN（窒素）、B（ボロン）とP（リン）の少なくとも一方の組み合わせである。

【0118】

また、pウェルコンタクト領域20のp型不純物とn型不純物とが相互作用して、3量体が形成されるためには、イオン注入後のp型不純物の分布とn型不純物の分布とが、膜厚方向の各位置に於いて、一定割合を掛けたものが略一致することが望ましい。つまり、各位置において、p型不純物とn型不純物とが、一定の割合（例えばAl量：N量＝2：1）になるように注入条件を見積もる。

【0119】

このため、n型不純物をイオン注入する際のプロジェクトドレンジ（Rp）が、p型不純物をイオン注入する際のプロジェクトドレンジ（Rp）に対し、90%以上110%以下の範囲にあるようにする。そして、95%以上105%以下の範囲にあることがより望ましい。

【0120】

SiC中での不純物の拡散長はSi中等と比較して小さい。したがって、p型不純物とn型不純物の双方のプロジェクトドレンジ（Rp）を変えて、複数のプロジェクトドレンジ（Rp）で多段階に分割したイオン注入を行い、pウェルコンタクト領域20を形成してもかまわない。これにより、深さ方向の不純物濃度分布がより均一なpウェルコンタクト領域20を形成することが可能となる。

【0121】

また、pウェルコンタクト領域20のシート抵抗または比抵抗を低減する観点から、n型不純物であるNのドーピング量の、p型不純物であるAlのドーピング量に対する比は、0.3より大きく1.0より小さい。

【0122】

また、p型不純物とn型不純物の相互作用により、pウェルコンタクト領域20のシート抵抗または比抵抗を低減する観点から、p型不純物であるAlの濃度が、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 以下となるようイオン注入時のドーピング量を制御する。

【0123】

ステップS110では、p型不純物とn型不純物とをイオン注入により共ドーピングしてpウェルコンタクト領域20を形成した後、活性化のためのアニールを行う。このアニールは、例えば、アルゴン（Ar）ガスを雰囲気ガスとして用いて、加熱温度1600℃、加熱時間30分といった条件が用いられる。この時、SiC内部に導入された不純物の活性化は実現できるが、拡散は僅かである。

【0124】

ステップS112では、例えば、 SiO_2 膜のゲート絶縁膜28がCVD（Chemical Vapor Deposition）法あるいは熱酸化法により形成される。そして、ステップS114では、ゲート絶縁膜28上に、例えば、ポリシリコンのゲート電極30が形成される。そして、ステップS116では、ゲート電極30上に、例えば、S

10

20

30

40

50

i O₂ 膜の層間絶縁膜 32 が形成される (図 14)。

【0125】

その後、ステップ S118 で、第 2 の SiC 領域 (ソース領域) 18 と、第 3 の SiC 領域 (p ウェルコンタクト領域) 20 とに電氣的に接続される導電性の第 1 の電極 (ソース・p ウェル共通電極) 24 が形成される。第 1 の電極 (ソース・p ウェル共通電極) 24 は、例えば、Ni (ニッケル) と Al のスパッタにより形成される。

【0126】

ステップ S120 では、n⁻ SiC 基板 12 の第 2 の面側に、導電性の第 2 の電極 (ドレイン電極) 36 が形成される。第 2 の電極 (ドレイン電極) 36 は、例えば、Ni のスパッタにより形成される。

10

【0127】

ステップ S122 では、第 1 の電極 24 と第 2 の電極 36 のコンタクト抵抗を低減するために、低温でのアニールが行われる。アニールは、例えば、アルゴンガス雰囲気、400℃で行われる。

【0128】

以上の製造方法により、図 1 に示す MOSFET 100 が形成される。

【0129】

本実施形態の製造方法によれば、p⁺ 型の第 3 の SiC 領域 (p ウェルコンタクト領域) 20 に、p 型不純物、例えば Al と、n 型不純物、例えば N が共ドーピングされる。したがって、p⁺ 型の第 3 の SiC 領域 20 のシート抵抗または比抵抗が低減される。また、第 3 の SiC 領域 20 と第 1 の電極 24 との間のコンタクト抵抗が低減される。よって、p ウェル電位 (チャネル電位) が安定し、高性能な MOSFET 100 を製造することが可能である。

20

【0130】

また、p 型不純物と n 型不純物との共ドーピングにより、各不純物が格子点に入りやすくなる。このため、ステップ S110 の活性化アニールの温度を、共ドーピングしない場合に比較して低温化することが可能となる。

【0131】

また、3 量体やペア構造の形成により結晶構造が安定化し、イオン注入時に形成された結晶欠陥が SiC 中に伸びることに起因する特性劣化を抑制することも可能となる。

30

【0132】

(第 2 の実施形態)

本実施形態の半導体装置は、n⁺ 型の第 2 の SiC 領域にも、p 型不純物と n 型不純物が共ドーピングされる点以外は、第 1 の実施形態と同様である。したがって、第 1 の実施形態と重複する内容については記述を省略する。

【0133】

本実施形態の半導体装置は、図 1 の MOSFET 100 において、n⁺ 型の第 2 の SiC 領域 (ソース領域) 18 に、p 型不純物と n 型不純物が共ドーピングされている。そして、第 2 の SiC 領域 (ソース領域) 18 中の p 型不純物を元素 A、n 型不純物を元素 D とする場合に、元素 A と元素 D との組み合わせが、Al (アルミニウム)、Ga (ガリウム) または In (インジウム) と N (窒素)、B (ボロン) と P (リン) の少なくとも一方の組み合わせである。例えば、元素 A が Al、元素 D が N である。

40

【0134】

本実施形態の MOSFET では n⁺ 型の第 2 の SiC 領域 (ソース領域) 18 に、p 型不純物、例えば Al と、n 型不純物、例えば N が共ドーピングされている。これにより、n⁺ 型の第 2 の SiC 領域 (ソース領域) 18 のシート抵抗または比抵抗が低減される。また、第 2 の SiC 領域 (ソース領域) 18 と第 1 の電極 24 との間のコンタクト抵抗が低減される。したがって、第 1 の実施形態の効果に加え、オン抵抗が低減し、さらに、高性能な MOSFET 100 が実現される。

【0135】

50

第2のSiC領域（ソース領域）18に含有されるn型不純物の濃度は、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 以下である。この範囲を下回ると、特にイオン注入で共ドーピングを行う場合に、p型不純物とn型不純物との相互作用が生じず、3量体が形成されないおそれがあるからである。また、この範囲を超えてn型不純物を固溶させることは困難だからである。

【0136】

第2のSiC領域（ソース領域）18のシート抵抗または比抵抗と、第2のSiC領域（ソース領域）18と第1の電極24との間のコンタクト抵抗とを十分低減し、オン抵抗を低減させる観点から、第2のSiC領域（ソース領域）18に含有されるn型不純物の濃度は、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上であることがより望ましい。

10

【0137】

第2のSiC領域（ソース領域）18のp型不純物を元素A、n型不純物を元素Dとする場合に、共ドーピングによる効果を得る観点から、元素Aの濃度の元素Dの濃度に対する比が、0.33より大きく1.0より小さい。また、第2のSiC領域（ソース領域）18のシート抵抗または比抵抗と、第2のSiC領域（ソース領域）18と、第1の電極24との間のコンタクト抵抗とを十分低減し、オン抵抗を低減させる観点から、元素Aの濃度の元素Dの濃度に対する比が、0.40より大きく0.95より小さいことが望ましい。また、0.45以上0.75以下であることがより望ましい。さらに、0.47以上0.60以下であることが一層望ましい。

【0138】

20

第2のSiC領域（ソース領域）18のp型不純物を元素A、n型不純物を元素Dとする場合に、シート抵抗または比抵抗を低減する観点から、元素Dのキャリア発生に寄与するドナー準位が40meV以下であることが望ましい。また、35meV以下であることがより望ましい。20meV以下であることがさらに望ましい。

【0139】

第2のSiC領域（ソース領域）18のシート抵抗または比抵抗と、第2のSiC領域（ソース領域）18と第1の電極24との間のコンタクト抵抗とを十分低減し、オン抵抗を低減させる観点から、p型不純物とn型不純物の大部分が3量体を形成することが望ましい。したがって、元素Aの90%以上が元素Dの最近接の格子位置にあることが望ましい。元素Dの90%以上が元素Aの最近接の格子位置にあれば、p型不純物とn型不純物の大部分（3量体を形成し得るうちの90%以上）が3量体を形成しているとみなすことができる。

30

【0140】

次に、本実施形態の半導体装置の製造方法について説明する。

【0141】

図15は、本実施形態の半導体装置の製造方法を例示するフロー図である。図16は、本実施形態の半導体装置の製造方法を示す模式断面図である。

【0142】

図15に示すように、半導体装置の製造方法は、第1の実施形態の方法に加えて、n型不純物イオン注入（ステップS104）の後に、p型不純物イオン注入（ステップS105）を備えている。

40

【0143】

ステップS105では、ステップS104と同じ第2のマスク材44をイオン注入マスクとして用いて、第2のSiC領域（ソース領域）18にp型不純物であるA1をイオン注入する（図16）。

【0144】

また、第2のSiC領域（ソース領域）18のシート抵抗または比抵抗と、第2のSiC領域（ソース領域）18と第1の電極24との間のコンタクト抵抗とを十分低減し、オン抵抗を低減させる観点から、p型不純物であるA1のドーズ量のn型不純物であるNのドーズ量に対する比が、0.33より大きく1.0より小さい。同様の観点から、n型不

50

純物であるNの濃度が、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 以下とするようドーピング量を制御する。

【0145】

ステップS106以降のプロセスは、第1の実施形態と同様である。

【0146】

本実施形態の製造方法によれば、第1の実施形態の効果に加え、オン抵抗が低減し、さらに、高性能なMOSFET100を製造することが可能となる。

【0147】

なお、第1および第2の実施形態では、 $n\text{-SiC}$ 層14の一部表面には、 p 型不純物の不純物濃度 $5 \times 10^{15} \sim 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 程度の p 型の第1の SiC 領域（ p ウェル領域）16が形成され、MOSFETのチャネル領域となっている。この領域に、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上のドーパントを導入して良い場合には、 p ウェルコンタクト領域と同様に共ドーピングを適用してもかまわない。

【0148】

一般に、チャネル領域の p 型ドーパントを高濃度化すると、電子の移動度劣化が起こる。しかし、共ドーピングによれば、歪が緩和されるので、移動度向上が見込まれる。また、一般に、 SiC には炭素欠陥があり、そのエネルギー準位に電子トラップが起こり、移動度が劣化する問題がある。しかし、チャネル領域を共ドーピングにすると、炭素欠陥が n 型ドーパント（正確にはC位置に入る側のドーパント）により埋められているので、電子トラップが発生しない。その分の移動度向上も見込まれる。

【0149】

もっとも、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上のドーパントをチャネル領域に導入すると、閾値が大きくなることが問題となる。よって、閾値が大きくても良い場合、あるいは、閾値を他の方法で低く出来る場合には、 p ウェル領域（チャネル領域）を共ドーピングにすることで、高性能のMOSFETが得られる。

【0150】

そのためには、例えば、絶縁膜／第1の SiC 領域の界面近傍において、 $0.33 < N/A1 < 1.0$ を保ちながら、両者とも $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上導入し、かつ、チャネルを形成する部分（ $3 \text{ nm} \sim 5 \text{ nm}$ 程度）で、 p 型ドーパントと n 型ドーパントの差分が $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以下になるように設計すればよい。

【0151】

また、界面近傍では差分が更に小さくなり、埋め込みチャネルにすると更に好ましい。界面ジャストでは、 $N/A1$ 比が 1.0 になっても良い。更に埋め込み構造として、 $1 \text{ nm} \sim 5 \text{ nm}$ 程度の $N/A1$ 比が 1.0 （互いに引き合うので、 $0.995 \sim 1.005$ 程度の範囲で 1.0 に一致させることが可能である）の領域を挿入しても良い。このように埋め込み構造になっている場合は、その埋め込み後の界面から奥側がチャネルとなる。チャネル位置から SiC 領域の奥方向に向かって、 $0.33 < N/A1 < 1.0$ を保ちながら、次第に p 型ドーパントと n 型ドーパントの差分が広がるようにする。つまり、界面近傍では、 $N/A1$ 比が 1.0 に近く、奥に向かうに従って、 0.5 に近づくようにすることが好ましい。

【0152】

この時、（1）閾値は $3 \text{ V} \sim 5 \text{ V}$ 程度の通常値となる。（2）上記のように移動度が向上する。これが成り立つためには、チャネル内で $0.33 < N/A1 < 1.0$ に保たれることが重量である。（3）更に、埋め込み構造となっているので界面凹凸による移動度劣化がなくなる。（4）第1の SiC 領域の奥側位置では、 p 型ドーパントと n 型ドーパントの差分を $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上となるように、 p 型ドーパント濃度を濃く出来るので、素子の高耐圧化が可能である。

【0153】

（第3の実施形態）

本実施形態の半導体装置は、第1と第2の面を有する n 型の SiC 基板と、 SiC 基板

10

20

30

40

50

の第1の面側に設けられたn型のSiC層を備える。そして、SiC層の表面に形成され、p型不純物とn型不純物を含有し、p型不純物を元素A、n型不純物を元素Dとする場合に、元素Aと元素Dとの組み合わせが、Al（アルミニウム）、Ga（ガリウム）またはIn（インジウム）とN（窒素）、B（ボロン）とP（リン）の少なくとも一方の組み合わせであり、上記組み合わせを構成する元素Dの濃度の元素Aの濃度に対する比（濃度D／濃度A）が0.33より大きく1.0より小さく、上記組み合わせを構成する元素Aの濃度が $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 以下であるp型のSiC領域を備える。さらに、SiC領域上に形成された第1の電極と、SiC基板の第2の面側に形成された第2の電極と、を備える。

【0154】

図17は、本実施形態の半導体装置であるPiNダイオードの構成を示す模式断面図である。なお、p型不純物とn型不純物との共ドーピングによる作用等は、第1の実施形態と同様であるので、以下、記述を省略する。

【0155】

このPiNダイオード200は、第1と第2の面を有するSiC基板（炭化珪素基板）12を備えている。図17においては、第1の面とは図の上側の面であり、第2の面とは図の下側の面である。このSiC基板12は、不純物濃度 $1 \times 10^{18} \sim 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 程度の、例えばN（窒素）をn型不純物として含む4H-SiC基板（n基板）である。

【0156】

このSiC基板12の第1の面上には、n型不純物の不純物濃度 $5 \times 10^{15} \sim 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 程度のn型のSiC層（n-SiC層）14が形成されている。n-SiC層14の膜厚は、例えば5～10μm程度である。

【0157】

n-SiC層14の表面には、p⁺型のSiC領域40を備えている。p⁺型のSiC領域40は、p型不純物とn型不純物が共ドーピングされている。そして、p型不純物を元素A、n型不純物を元素Dとする場合に、元素Aと元素Dとの組み合わせが、Al（アルミニウム）、Ga（ガリウム）またはIn（インジウム）とN（窒素）、B（ボロン）とP（リン）の少なくとも一方の組み合わせである。以下、元素AがAl、元素DがNである場合を例に説明する。

【0158】

そして、p型のSiC領域40と電氣的に接続される導電性の第1の電極（アノード電極）44を備えている。第1の電極44は、例えば、Ni（ニッケル）のバリアメタル層44aと、バリアメタル層44a上のAlのメタル層44bとで構成される。Niのバリアメタル層44aとAlのメタル層44bとは反応により合金を形成していてもよい。

【0159】

また、SiC基板12の第2の面側には、導電性の第2の電極（カソード電極）46が形成されている。第2の電極46は、例えば、Niである。

【0160】

本実施形態のPiNダイオード200では、p⁺型のSiC領域40に、p型不純物、例えばAlと、n型不純物、例えばNが共ドーピングされている。これにより、p⁺型のSiC領域40のシート抵抗または比抵抗が低減される。また、p型のSiC領域40と、第1の電極44との間のコンタクト抵抗が低減される。したがって、順方向電流の大きなPiNダイオード200が実現される。

【0161】

また、3量体が形成されていることにより、結晶構造が安定して結晶欠陥が低減し、逆バイアス時のリーク電流が低減されたPiNダイオード200が実現される。そして、結晶構造が安定することで、通電破壊耐性に優れ、Vf劣化の少ない高耐圧のPiNダイオード200が実現される。

【0162】

10

20

30

40

50

p⁺型のSiC領域40に含有されるp型不純物の濃度は、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 以下である。この範囲を下回ると、特にイオン注入で共ドーピングを行う場合に、p型不純物とn型不純物との相互作用が生じず、3量体が形成されないおそれがあるからである。また、この範囲を超えてp型不純物を固溶させることは困難だからである。

【0163】

p⁺型のSiC領域40のシート抵抗または比抵抗と、p⁺型のSiC領域40と第1の電極44との間のコンタクト抵抗とを十分低減させる観点から、p⁺型のSiC領域40に含有されるp型不純物の濃度は、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上であることがより望ましい。

10

【0164】

p⁺型のSiC領域40のp型不純物を元素A、n型不純物を元素Dとする場合に、p⁺型のSiC領域40のシート抵抗または比抵抗と、p⁺型のSiC領域40と第1の電極44との間のコンタクト抵抗とを十分低減させる観点から、元素Dの濃度の元素Aの濃度に対する比が、0.33より大きく1.0より小さい。また、0.40より大きく0.95より小さいことが望ましい。また、0.45以上0.75以下であることがより望ましい。さらに、0.47以上0.60以下であることが一層望ましい。

【0165】

p⁺型のSiC領域40のp型不純物を元素A、n型不純物を元素Dとする場合に、共ドープによる効果を得る観点から、元素Aのキャリア発生に寄与するアクセプタ準位が150meV以下であることが望ましい。また、100meV以下であることがより望ましく、40meV以下であることが一層望ましい。

20

【0166】

p型のSiC領域40のシート抵抗と、p型のSiC領域40と、第1の電極44との間のコンタクト抵抗とを十分低減させる観点から、p型不純物とn型不純物の大部分が3量体を形成することが望ましい。したがって、元素Dの90%以上が元素Aの最近接の格子位置にあることが望ましい。元素Dの90%以上が元素Aの最近接の格子位置にあれば、p型不純物とn型不純物の大部分（3量体を形成し得るうちの90%以上）が3量体を形成しているとみなすことができる。

【0167】

本実施形態のPINダイオード200は、例えば、p⁺型のSiC領域40をイオン注入により形成する際に、p型不純物であるAlと、n型不純物であるNを共ドープすることにより形成することが可能である。

30

【0168】

そして、p⁺型のSiC領域40をイオン注入により形成する際、n型不純物をイオン注入する際のプロジェクトレンジ(Rp)が、p型不純物をイオン注入する際のプロジェクトレンジ(Rp)に対し90%以上110%以下の範囲にあるようにする。p型不純物とn型不純物を近接させ、3量体の形成を容易にするためである。

【0169】

なお、PINダイオードにメサ構造を適用することも可能である。

40

【0170】

(第4の実施形態)

本実施形態の半導体装置は、n型のSiC層と、SiC層の表面に形成されたp型の第1のSiC領域と、第1のSiC領域の表面に形成されたn型の第2のSiC領域と、第1のSiC領域の表面に形成されたp型の第4のSiC領域と、を備える。そして、n型のSiC層の裏面側に形成され、p型不純物とn型不純物を含有し、p型不純物を元素A、n型不純物を元素Dとする場合に、元素Aと元素Dとの組み合わせが、Al（アルミニウム）、Ga（ガリウム）またはIn（インジウム）とN（窒素）、B（ボロン）とP（リン）の少なくとも一方の組み合わせであり、上記組み合わせを構成する元素Dの濃度の元素Aの濃度に対する比（濃度D／濃度A）が0.33より大きく1.0より小さく、上

50

記組み合わせを構成する元素Aの濃度が $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 以下であるp型の第3のSiC領域を備える。さらに、SiC層、第1のSiC領域の表面に連続的に形成されたゲート絶縁膜と、ゲート絶縁膜上に形成されたゲート電極と、第2のSiC領域および第4のSiC領域上に形成された第1の電極と、第3のSiC領域側に形成された第2の電極と、を備える。

【0171】

図18は、本実施形態の半導体装置であるIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) の構成を示す模式断面図である。なお、p型不純物とn型不純物との共ドーピングによる作用等は、第1の実施形態と同様であるので、以下、記述を省略する。

【0172】

このIGBT 300は、第1と第2の面を有するSiC基板（炭化珪素基板）12を備えている。図18においては、第1の面とは図の上側の面であり、第2の面とは図の下側の面である。このSiC基板12は、不純物濃度 $1 \times 10^{18} \sim 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 程度の、例えばN（窒素）をn型不純物として含む4H-SiC基板（n基板）である。

【0173】

このSiC基板12の第1の面上には、n型不純物の不純物濃度 $5 \times 10^{15} \sim 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 程度のn型のSiC層（n-SiC層）14が形成されている。n-SiC層14の膜厚は、例えば $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 程度である。

【0174】

n-SiC層14の一部表面には、p型不純物の不純物濃度 $5 \times 10^{15} \sim 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 程度のp型の第1のSiC領域（第1のエミッタ領域）66が形成されている。第1のエミッタ領域66の深さは、例えば $0.6 \mu\text{m}$ 程度である。

【0175】

第1のSiC領域（第1のエミッタ領域）66の一部表面には、n型不純物の不純物濃度 $1 \times 10^{18} \sim 1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 程度のn⁺型の第2のSiC領域（第2のエミッタ領域）58が形成されている。第2のエミッタ領域58の深さは、第1のSiC領域（第1のエミッタ領域）66の深さよりも浅く、例えば $0.3 \mu\text{m}$ 程度である。

【0176】

また、第1のSiC領域（第1のエミッタ領域）66の一部表面であって、n⁺型の第2のSiC領域（第2のエミッタ領域）58の側方に、p型不純物の不純物濃度 $1 \times 10^{18} \sim 1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 程度のp⁺型の第4のSiC領域（エミッタコンタクト領域）60が形成されている。エミッタコンタクト領域60の深さは、第1のSiC領域（第1のエミッタ領域）66の深さよりも浅く、例えば $0.3 \mu\text{m}$ 程度である。

【0177】

そして、n型のSiC層14の裏面側に、p⁺型の第3のSiC領域（コレクタ領域）52が設けられている。本実施形態では、SiC基板12の裏面がp⁺型の第3のSiC領域52となっている。

【0178】

p⁺型の第3のSiC領域52は、p型不純物とn型不純物が共ドーピングされている。そして、p型不純物を元素A、n型不純物を元素Dとする場合に、元素Aと元素Dとの組み合わせが、Al（アルミニウム）、Ga（ガリウム）またはIn（インジウム）とN（窒素）、B（ボロン）とP（リン）の少なくとも一方の組み合わせであり、上記組み合わせを構成する元素Dの濃度の元素Aの濃度に対する比（濃度D／濃度A）が 0.33 より大きく 1.0 より小さい。以下、元素AがAl、元素DがNである場合を例に説明する。

【0179】

SiC層（n層）14および第1のSiC領域（第1のエミッタ領域）66の表面に連続的に、これらの領域および層を跨ぐように形成されたゲート絶縁膜28を備えている。ゲート絶縁膜28には、例えばSiO₂膜やhigh-k絶縁膜が適用可能である。

【0180】

10

20

30

40

50

そして、ゲート絶縁膜 28 上には、ゲート電極 30 が形成されている。ゲート絶縁膜 28 には、例えば、 SiO_2 膜が用いられる。ゲート電極 30 には、例えばポリシリコン等が適用可能である。ゲート電極 30 上には、例えば、 SiO_2 膜で形成される層間絶縁膜 32 が形成されている。

【0181】

ゲート電極下の第 2 の SiC 領域（第 2 のエミッタ領域）58 と SiC 層（ n^- 層）14 とに挟まれる第 1 の SiC 領域 66 がチャンネル領域となる。

【0182】

そして、第 2 の SiC 領域（第 2 のエミッタ領域）58 と、第 4 の SiC 領域（エミッタコンタクト領域）60 と電氣的に接続される導電性の第 1 の電極（エミッタ電極）54 を備えている。第 1 の電極（エミッタ電極）54 は、例えば、Ni（ニッケル）のバリアメタル層 54a と、バリアメタル層 54a 上の Al のメタル層 54b とで構成される。Ni のバリアメタル層 54a と Al のメタル層 54b とは反応により合金を形成していてもよい。

【0183】

また、SiC 基板 12 の第 2 の面側、第 3 の SiC 領域 52 の裏面には、導電性の第 2 の電極（コレクタ電極）56 が形成されている。第 2 の電極（コレクタ電極）56 は、例えば、Ni である。

【0184】

なお、本実施形態において、 n 型不純物は例えば、N（窒素）や P（リン）が好ましいが、As（ヒ素）等を適用することも可能である。また、 p 型不純物は例えば、Al（アルミニウム）が好ましいが、B（ボロン）、Ga（ガリウム）、In（インジウム）等を適用することも可能である。

【0185】

本実施形態の IGBT 300 では、第 3 の SiC 領域（コレクタ領域）52 に、 p 型不純物、例えば Al と、 n 型不純物、例えば N が共ドーピングされている。これにより、第 3 の SiC 領域 52 のシート抵抗または比抵抗が低減される。また、第 3 の SiC 領域 52 と第 2 の電極（コレクタ電極）56 との間のコンタクト抵抗が低減される。したがって、オン電流の大きな IGBT 300 が実現される。

【0186】

本実施形態では、ドーパントのエネルギー準位が浅く出来るので、キャリアの生成・消滅が高速になる。その結果、共ドーピングを使わなかった場合の IGBT に比較して、ON に掛かる時間、OFF に掛かる時間ともに、少なくとも半分以下にすることが可能である。共ドーピングの適用範囲を広げれば、更なる高速化の余地もあり、バイポーラデバイスの弱点である低速動作の問題が解決できる。

【0187】

共ドーピングの適用範囲を広げる場合、例えば、チャンネル領域（第 1 のエミッタ領域）に共ドーピングを使うことが考えられる。 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 程度のドーパントを導入することが、閾値等のデバイス特性を鑑みて許容できれば適用可能である。更に、エピタキシャル成長技術により、チャンネル領域、ドリフト層などに共ドーピングを適用することが考えられる。つまり、バイポーラデバイスを構成する部分のうち、電荷が出入りする部分の、少しでも多くの部分に共ドーピングを導入できれば、更なる高速化が可能である。

【0188】

また、3 量体が形成されていることにより、結晶構造が安定して結晶欠陥が低減し、逆バイアス時のリーク電流が低減された IGBT 300 が実現される。さらに、結晶構造が安定することで、通電破壊耐性に優れた IGBT 300 が実現される。

【0189】

第 3 の SiC 領域 52 に含有される p 型不純物の濃度は、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 以下である。この範囲を下回ると、特にイオン注入で共ドーピングを行う場合に、 p 型不純物と n 型不純物との相互作用が生じず、3 量体が形成されないおそ

10

20

30

40

50

れがあるからである。また、この範囲を超えて p 型不純物を固溶させることは困難だからである。

【0190】

第3の SiC 領域52のシート抵抗または比抵抗と、第3の SiC 領域52と第2の電極56との間のコンタクト抵抗とを十分低減させる観点から、第3の SiC 領域52に含有される p 型不純物の濃度は、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上であることがより望ましい。

【0191】

第3の SiC 領域52の p 型不純物を元素 A、n 型不純物を元素 D とする場合に、共ドープによる効果を得る観点から、元素 D の濃度の元素 A の濃度に対する比が、0.33 より大きく 1.0 より小さい。また、第3の SiC 領域52のシート抵抗と、第3の SiC 領域52と、第2の電極56との間のコンタクト抵抗とを十分低減させる観点から、元素 D の濃度の元素 A の濃度に対する比が、0.40 より大きく 0.95 より小さいことが望ましい。また、0.45 以上 0.75 以下であることがより望ましい。さらに、0.47 以上 0.60 以下であることが一層望ましい。

【0192】

第3の SiC 領域52の p 型不純物を元素 A、n 型不純物を元素 D とする場合に、第3の SiC 領域52のシート抵抗または比抵抗を低減し、第3の SiC 領域52と第2の電極54との間のコンタクト抵抗を低減する観点から、元素 A のキャリア発生に寄与するアクセプタ準位が 150 meV 以下であることが望ましい。また、100 meV 以下であることがより望ましく、40 meV 以下であることが一層望ましい。

【0193】

第3の SiC 領域52のシート抵抗または比抵抗と、第3の SiC 領域52と第2の電極56との間のコンタクト抵抗とを十分低減させる観点から、p 型不純物と n 型不純物の大部分が 3 量体を形成することが望ましい。したがって、元素 D の 90% 以上が元素 A の最近接の格子位置にあることが望ましい。元素 D の 90% 以上が元素 A の最近接の格子位置にあれば、p 型不純物と n 型不純物の大部分（3 量体を形成し得るうちの 90% 以上）が 3 量体を形成しているとみなすことができる。

【0194】

なお、n⁺型の第2の SiC 領域（第2のエミッタ領域）58に p 型不純物、または、p⁺型の第4の SiC 領域（エミッタコンタクト領域）60に n 型不純物を共ドープする構成とすることも可能である。この場合、それぞれの領域の抵抗および第1の電極54のコンタクト抵抗が低減し、更に高性能な IGBT が実現される。

【0195】

次に、本実施形態の半導体装置の製造方法について説明する。

【0196】

図19は、本実施形態の半導体装置の製造方法を例示するフロー図である。図20～図25は、本実施形態の半導体装置の製造方法を示す模式断面図である。

【0197】

図19に示すように、半導体装置の製造方法は、n⁻ SiC 層形成（ステップ S200）、p 型不純物イオン注入（ステップ S202）、n 型不純物イオン注入（ステップ S204）、p 型不純物イオン注入（ステップ S206）、p 型不純物イオン注入（ステップ S208）、n 型不純物イオン注入（ステップ S209）、アニール（ステップ S210）、ゲート絶縁膜形成（ステップ S212）、ゲート電極形成（ステップ S214）、層間膜形成（ステップ S216）、第1の電極形成（ステップ S218）、第2の電極形成（ステップ S220）およびアニール（ステップ S222）を備える。

【0198】

まず、n 型不純物として P（リン）または N（窒素）を不純物濃度 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 程度含み、例えば、厚さ 300 μm であり、4H-SiC の低抵抗の n 型の SiC 基板 12 を準備する。

【0199】

ステップS200では、SiC基板12の一方の面（第1の面）上にエピタキシャル成長法により、n型不純物として、例えばNを不純物濃度 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 程度含み、厚さが $10 \mu\text{m}$ 程度の高抵抗のn-SiC層14を成長させる。

【0200】

その後、フォトリソグラフィーとエッチングによるパターニングにより、例えばSiO₂の第1のマスク材42を形成する。ステップS102では、この第1のマスク材42をイオン注入マスクとして用いて、p型不純物であるAlをSiC層14にイオン注入し、第1のSiC領域（第1のエミッタ領域）66を形成する（図20）。

【0201】

その後、フォトリソグラフィーとエッチングによるパターニングにより、例えばSiO₂の第2のマスク材44を形成する。ステップS204では、この第2のマスク材44をイオン注入マスクとして用いて、n型不純物であるNをn-SiC層14にイオン注入し、第2のSiC領域（第2のエミッタ領域）58を形成する（図21）。

【0202】

その後、フォトリソグラフィーとエッチングによるパターニングにより、例えばSiO₂の第3のマスク材46を形成する。ステップS206では、この第3のマスク材46をイオン注入マスクとして用いて、p型不純物であるAlをn-SiC層14にイオン注入し、第4のSiC領域（エミッタコンタクト領域）60を形成する（図22）。

【0203】

次に、ステップS208において、p型不純物であるAlをSiC基板12の裏面（第2の面）にイオン注入し、第3のSiC領域（コレクタ領域）52を形成する（図23）。

【0204】

さらに、ステップS209では、第3のSiC領域（コレクタ領域）52にn型不純物であるNをイオン注入する（図24）。

【0205】

このように、ステップS208とステップS209で、p型不純物とn型不純物とをイオン注入により共ドーピングしてコレクタ領域52を形成する。ここでは、p型不純物としてAl、n型不純物としてNを例示したが、p型不純物を元素A、n型不純物を元素Dとする場合に、元素Aと元素Dとの組み合わせが、Al（アルミニウム）、Ga（ガリウム）またはIn（インジウム）とN（窒素）、B（ボロン）とP（リン）の少なくとも一方の組み合わせである。

【0206】

また、コレクタ領域52のp型不純物とn型不純物とが相互作用して、3量体が形成されるためには、イオン注入後のp型不純物の分布とn型不純物の分布とが一致することが望ましい。

【0207】

このため、n型不純物をイオン注入する際のプロジェクトドレンジ（Rp）が、p型不純物をイオン注入する際のプロジェクトドレンジ（Rp）に対し90%以上110%以下の範囲にあるようにする。そして、95%以上105%以下の範囲にあることが望ましい。

【0208】

また、コレクタ領域52のシート抵抗および比抵抗を低減する観点から、n型不純物であるNのドーパ量のp型不純物であるAlのドーパ量に対する比が、0.33より大きく1.0より小さいことが望ましい。

【0209】

また、p型不純物とn型不純物との相互作用によりコレクタ領域52のシート抵抗および比抵抗を低減する観点から、p型不純物であるAlの濃度が、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 以下とするようドーパ量を制御する。

【0210】

10

20

30

40

50

ステップS 2 1 0では、p型不純物とn型不純物とをイオン注入により共ドーピングしてコレクタ領域5 2を形成した後、活性化のためのアニールを行う。このアニールは、例えば、アルゴン(Ar)ガスを雰囲気ガスとして用いて、加熱温度1 6 0 0℃、加熱時間3 0分といった条件が用いられる。この時、SiC内部に導入された不純物の活性化は実現できるが、拡散は僅かである。

【0 2 1 1】

ステップS 2 1 2では、例えば、SiO₂膜のゲート絶縁膜2 8がCVD(Chemical Vapor Deposition)法あるいは熱酸化法により形成される。そして、ステップS 2 1 4では、ゲート絶縁膜2 8上に、例えば、ポリシリコンのゲート電極3 0が形成される。そして、ステップS 2 1 6では、ゲート電極3 0上に、例えば、SiO₂膜で形成される層間絶縁膜3 2が形成される(図2 5)。

10

【0 2 1 2】

その後、ステップS 2 1 8で、第2のSiC領域(エミッタ領域)5 8と、第4のSiC領域(エミッタコンタクト領域)6 0と電気的に接続される導電性の第1の電極(エミッタ電極)5 4が形成される。第1の電極(エミッタ電極)5 4は、例えば、Ni(ニッケル)とAlのスパッタにより形成される。

【0 2 1 3】

ステップS 2 2 0では、コレクタ領域5 2の裏面側には、導電性の第2の電極(コレクタ電極)5 6が形成される。第2の電極(コレクタ電極)5 6は、例えば、Niのスパッタにより形成される。

20

【0 2 1 4】

ステップS 2 2 2では、第1の電極5 4と第2の電極5 6のコンタクト抵抗を低減するために、低温でのアニールが行われる。アニールは、例えば、アルゴンガス雰囲気中、4 0 0℃で行われる。

【0 2 1 5】

以上の製造方法により、図1 8に示すIGBTが形成される。

【0 2 1 6】

本実施形態の製造方法によれば、p型のコレクタ領域5 2に、p型不純物、例えばAlと、n型不純物、例えばNが共ドーピングされる。したがって、p型のコレクタ領域5 2のシート抵抗および比抵抗が低減される。また、コレクタ領域5 2と、第2の電極(コレクタ電極)5 6との間のコンタクト抵抗が低減される。よって、オン抵抗が低減した、高性能なIGBT 3 0 0を製造することが可能である。

30

【0 2 1 7】

また、p型不純物とn型不純物との共ドーピングにより、各不純物が格子点に入りやすくなる。このため、ステップS 2 1 0の活性化アニールの温度が共ドーピングしない場合に比較して低温化することが可能となる。

【0 2 1 8】

また、3量体やベア構造の形成により結晶構造が安定化し、イオン注入時に形成された結晶欠陥がSiC中に伸びることに起因する特性劣化を抑制することも可能となる。

【0 2 1 9】

40

また、イオン注入により基板の裏面に低抵抗のp⁺型領域を容易に形成することが可能となる。したがって、p型に比べ比較的製造が容易なn型のSiC基板1 2を用いて、IGBTの製造を行うことが可能となる。

【0 2 2 0】

なお、例えば、p型のコレクタ領域5 2形成前に、n型の領域を薄くするために、SiC基板1 2を裏面側から研磨するステップを設けてもかまわない。

【0 2 2 1】

また、コレクタ領域5 2形成前に、n型のSiC基板1 2またはn型のSiC層(n-SiC層)1 4の裏面に、n型不純物をイオン注入してn⁺型のバッファ層を形成するステップを設けてもかまわない。このステップにおいて、n⁺型のバッファ層にp型不純物

50

、例えば、Alをイオン注入により共ドーブし、 n^+ 型のバッファ層の抵抗を低減することも可能である。つまり、 n^+ 型のバッファ層（N量：Al量＝2：1）と、 p^+ 型領域（Al量：N量＝2：1）をAl量、N量の奥行き方向の打ち込み量の違いにより、作り分けてもよい。

【0222】

（第5の実施形態）

本実施形態の半導体材料は、SiC中にp型不純物とn型不純物を含有するp型の半導体材料である。そして、p型不純物を元素A、n型不純物を元素Dとする場合に、元素Aと元素Dとの組み合わせが、Al（アルミニウム）、Ga（ガリウム）またはIn（インジウム）とN（窒素）、B（ボロン）とP（リン）の少なくとも一方の組み合わせであり、上記組み合わせを構成する元素Dの濃度の元素Aの濃度に対する比が0.33より大きく1.0より小さい。

10

【0223】

本実施形態の半導体材料は、例えば、SiCのインゴットまたは、SiCのウェハである。本実施形態の半導体材料は、SiC中に、所定のp型不純物とn型不純物が、所定の割合で共ドーブされている。この構成により、第1の実施形態で詳述した作用により、低抵抗で欠陥密度の低いp型のSiC半導体材料が実現される。

【0224】

p型のSiC半導体材料に含有される上記組み合わせを構成するp型不純物である元素Aの濃度は、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 以下であることが望ましい。この範囲を下回ると、特にイオン注入で共ドーピングを行う場合に、p型不純物とn型不純物との相互作用が生じず、3量体が形成されないおそれがあるからである。また、この範囲を超えてp型不純物を固溶させることは困難だからである。

20

【0225】

p型のSiC半導体材料の上記組み合わせを構成するp型不純物を元素A、n型不純物を元素Dとする場合に、p型のSiC半導体材料のシート抵抗または比抵抗を十分低減させる観点から、元素Dの濃度の元素Aの濃度に対する比が、0.33より大きく1.0より小さい。また、元素Dの濃度の元素Aの濃度に対する比が、0.40より大きく0.95より小さいことが望ましい。また、0.45以上0.75以下であることがより望ましい。さらに、0.47以上0.60以下であることが一層望ましい。

30

【0226】

p型のSiC半導体材料の上記組み合わせを構成するp型不純物を元素A、n型不純物を元素Dとする場合に、共ドーブによる効果を得る観点から、元素Aのアクセプタ準位が150meV以下であることが望ましい。また、100meV以下であることがより望ましく、40meV以下であることが一層望ましい。

【0227】

p型のSiC半導体材料のシート抵抗または比抵抗を低減させる観点から、p型不純物とn型不純物の大部分が3量体を形成することが望ましい。したがって、元素Dの90%以上が元素Aの最近接の格子位置にあることが望ましい。元素Dの90%以上が元素Aの最近接の格子位置にあれば、p型不純物とn型不純物の大部分（3量体を形成し得るうちの90%以上）が3量体を形成しているとみなすことができる。

40

【0228】

以上、実施形態では、炭化珪素の結晶構造として4H-SiCの場合を例に説明したが、本発明は6H-SiC、3C-SiC等、その他の結晶構造の炭化珪素に適用することも可能である。

【0229】

また、実施形態では、p型不純物とn型不純物の組み合わせとして、Al（アルミニウム）とN（窒素）の組み合わせの場合を例に説明したが、この組み合わせに限らず、Al（アルミニウム）、Ga（ガリウム）またはIn（インジウム）とN（窒素）、B（ボロン）とP（リン）の組み合わせであれば、同様の効果を得ることが可能である。

50

【0230】

第1および第2の実施形態では、n型のSiC基板を用いてMOSFETを形成する場合を例に説明したが、n型のSiC基板をp型のSiC基板にかえることによりIGBTを形成してもかまわない。

【0231】

本発明のいくつかの実施形態を説明したが、これらの実施形態は、例として提示したものであり、発明の範囲を限定することは意図していない。これら新規な実施形態は、その他の様々な形態で実施されることが可能であり、発明の要旨を逸脱しない範囲で、種々の省略、置き換え、変更を行うことができる。例えば、一実施形態の構成要素を他の実施形態の構成要素と置き換えまたは変更してもよい。これら実施形態やその変形は、発明の範囲や要旨に含まれるとともに、特許請求の範囲に記載された発明とその均等の範囲に含まれる。

10

【符号の説明】

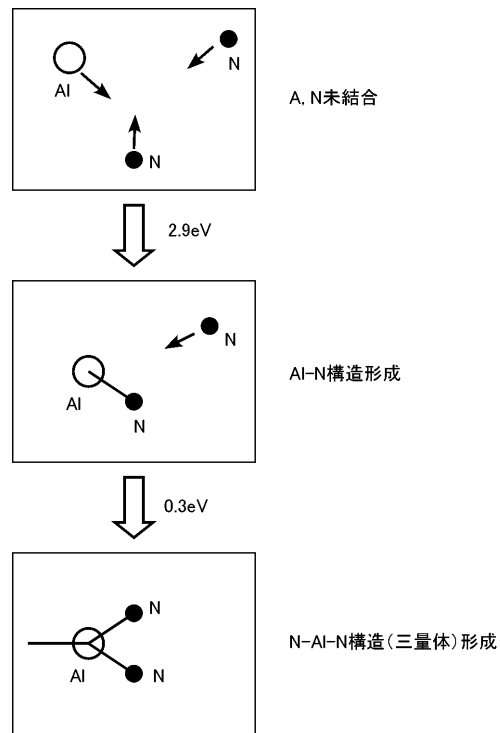
【0232】

12	SiC基板
14	SiC層(n層)
16	第1のSiC領域(pウェル領域)
18	第2のSiC領域(ソース領域)
20	第3のSiC領域(pウェルコンタクト領域)
24	第1の電極(ソース・pウェル共通電極)
28	ゲート絶縁膜
30	ゲート電極
32	層間絶縁膜
36	第2の電極(ドレイン電極)
44	第1の電極(アノード電極)
46	第2の電極(カソード電極)
52	第3のSiC領域(コレクタ領域)
54	第1の電極(エミッタ電極)
56	第2の電極(コレクタ電極)
58	第2のSiC領域(第2のエミッタ領域)
60	第4のSiC領域(エミッタコンタクト領域)
66	第1のSiC領域(第1のエミッタ領域)
100	MOSFET
200	Pinダイオード
300	IGBT

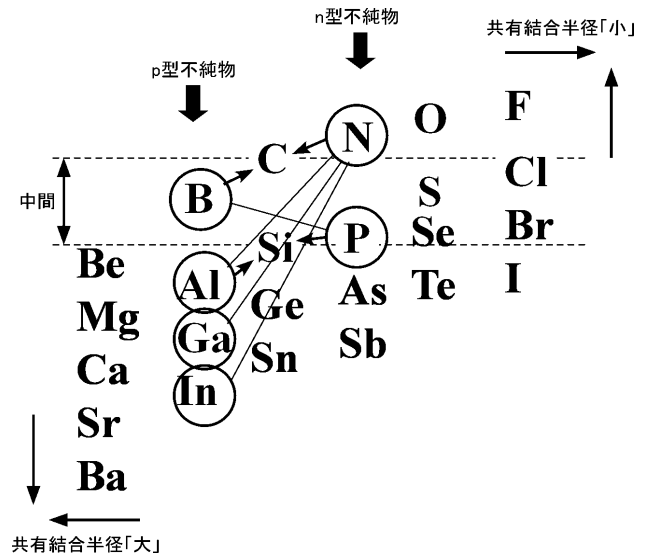
20

30

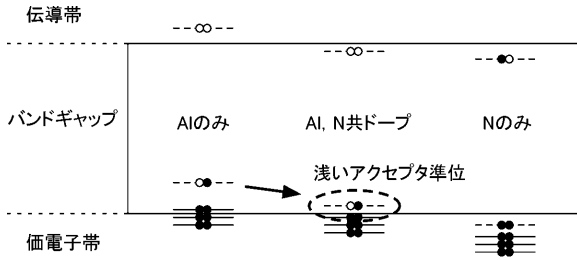
【図 2】



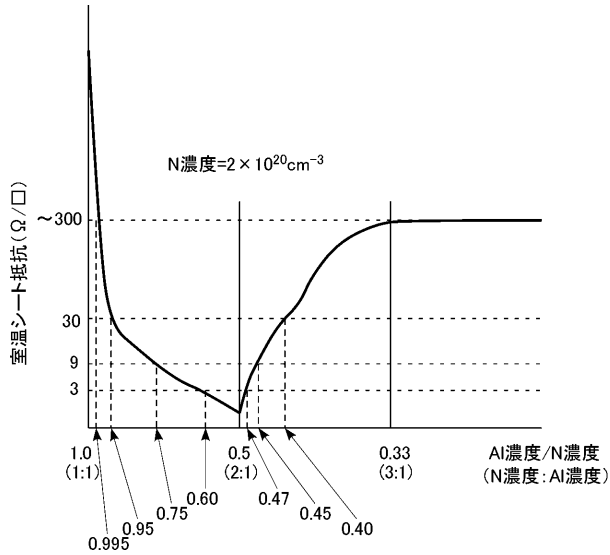
【図 4】



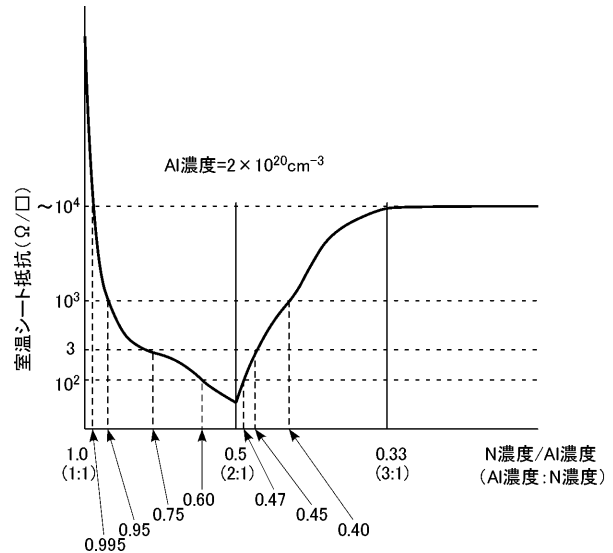
【図 6】



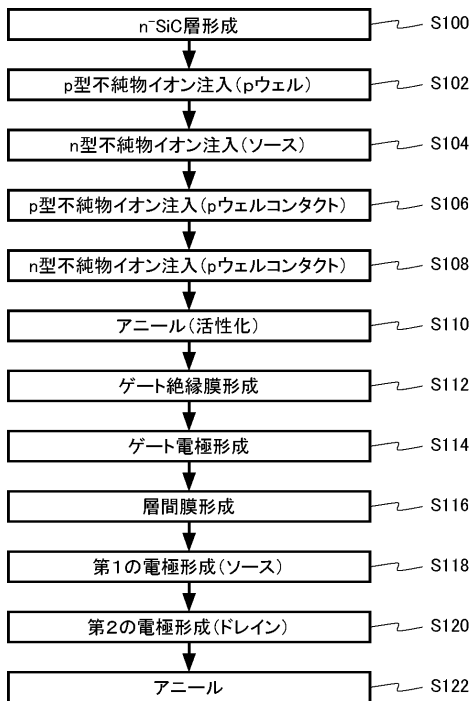
【図 7】



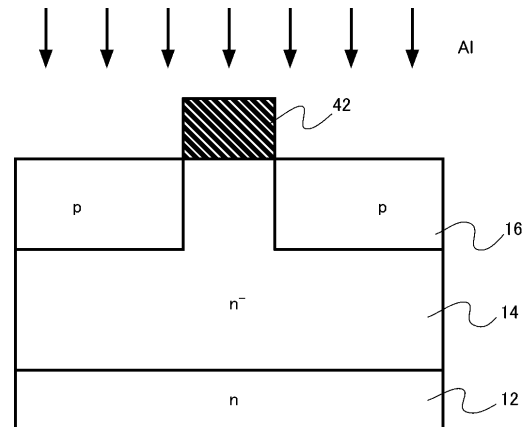
【図 8】



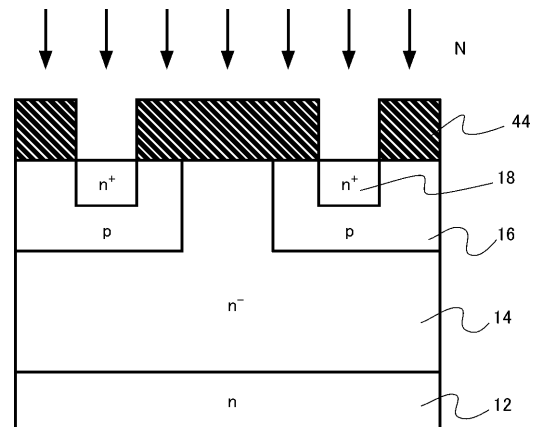
【図 9】



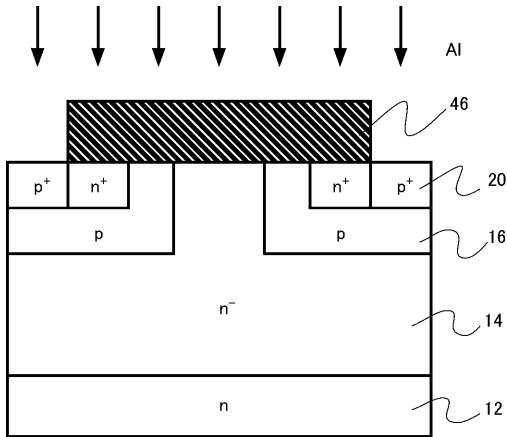
【図 10】



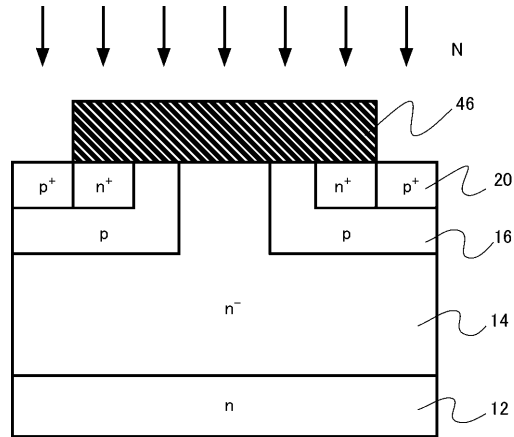
【図 11】



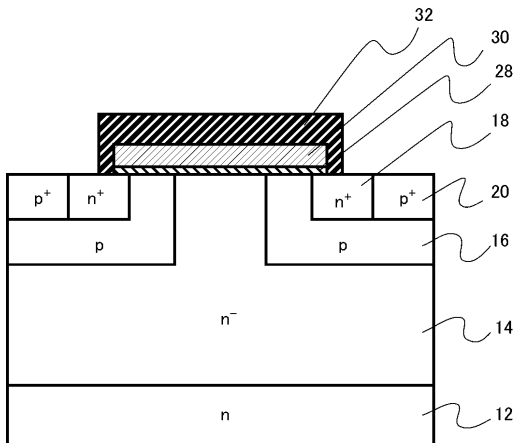
【図 1 2】



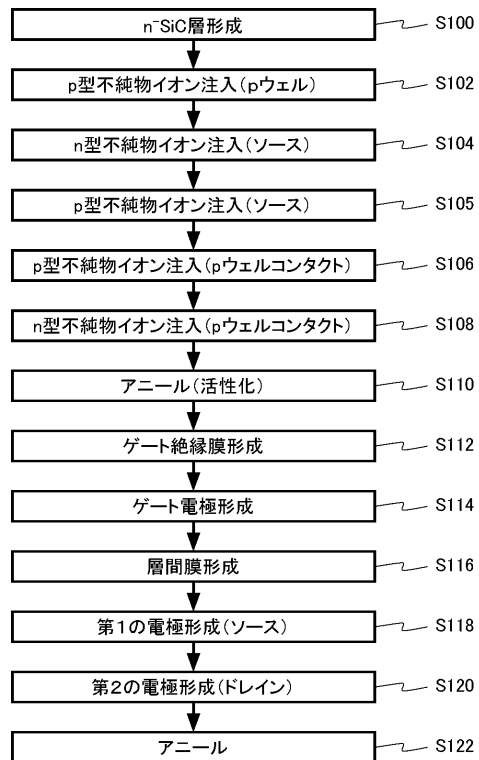
【図 1 3】



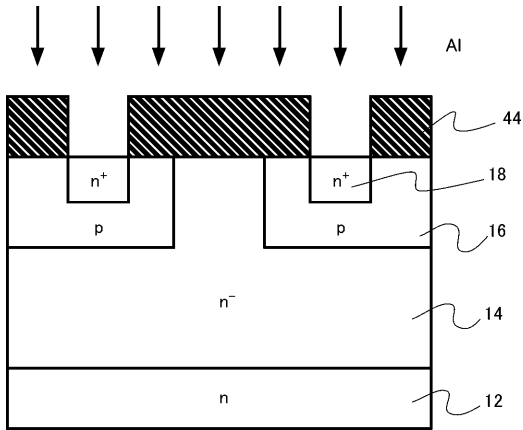
【図 1 4】



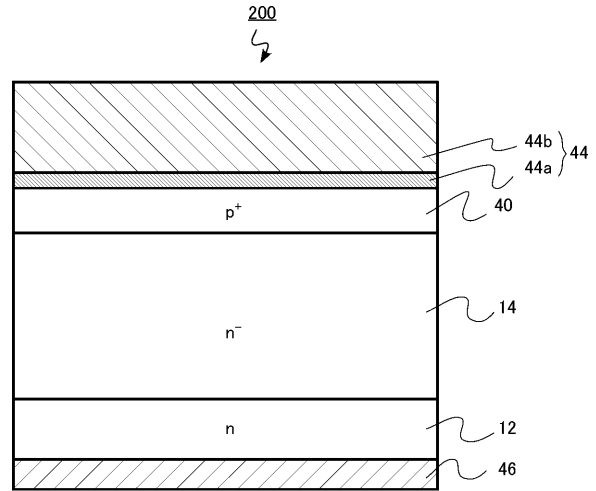
【図 1 5】



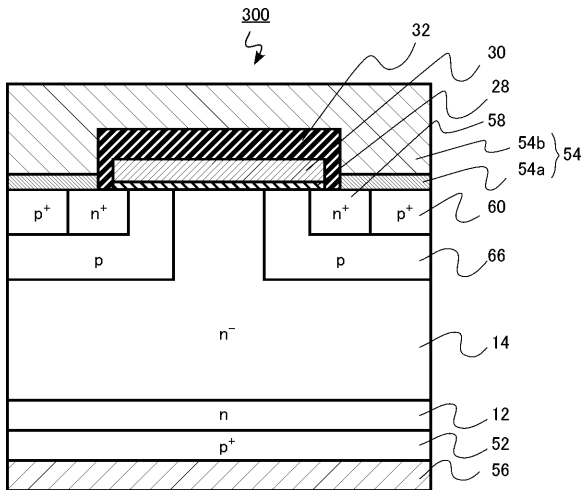
【図 16】



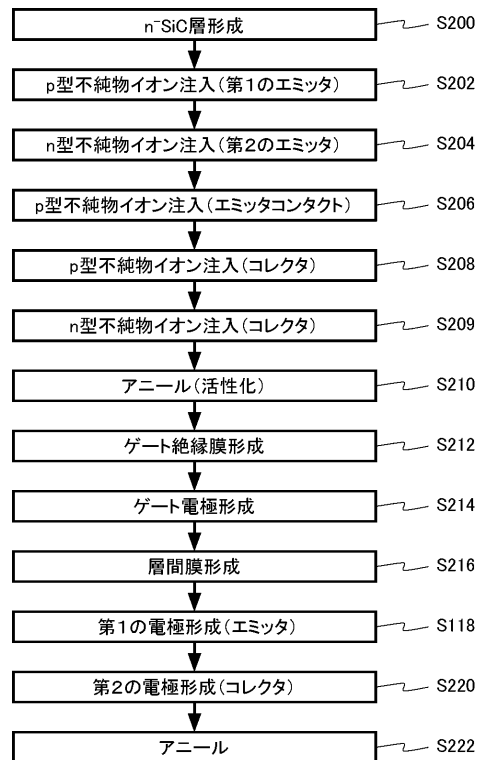
【図 17】



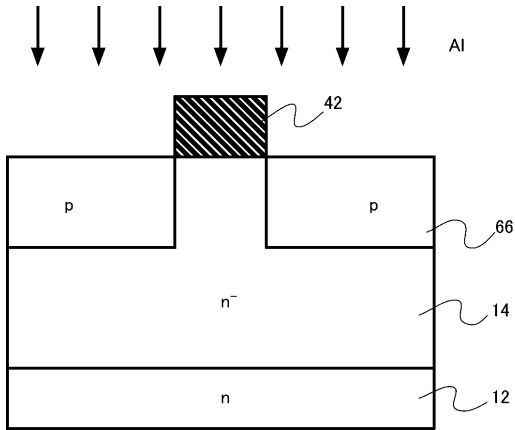
【図 18】



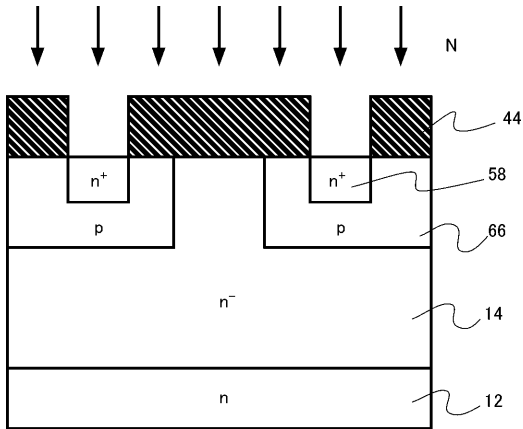
【図 19】



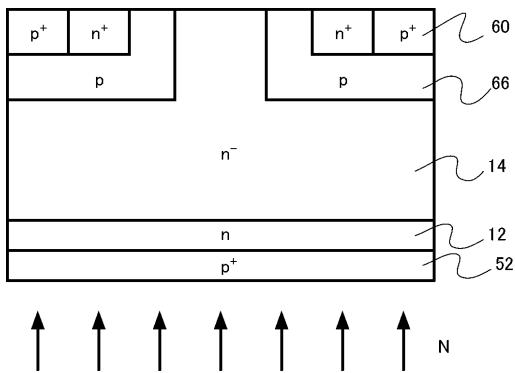
【図 20】



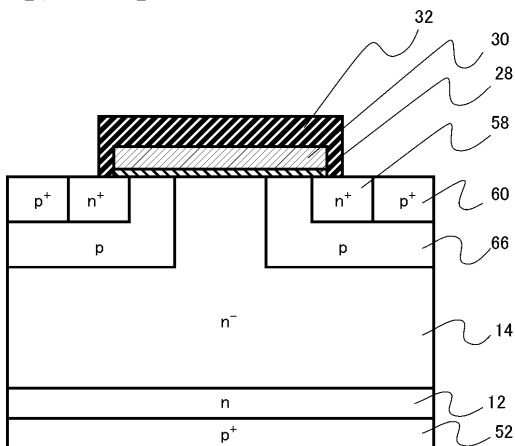
【図 21】



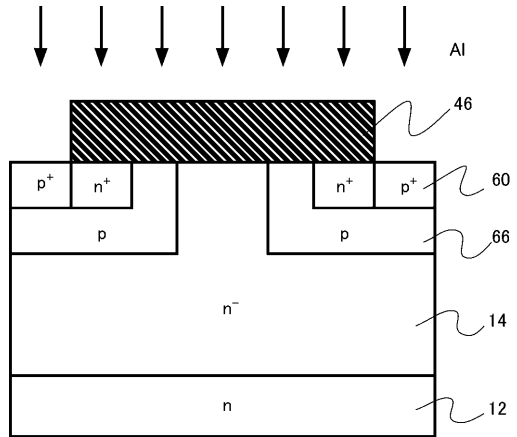
【図 24】



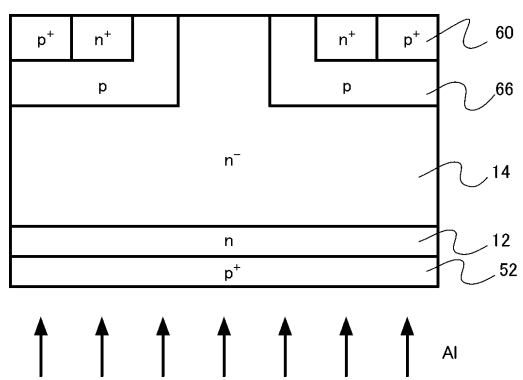
【図 25】



【図 22】



【図 23】



フロントページの続き

(51)Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
	H 0 1 L 21/265 F	
	H 0 1 L 21/265 6 0 2 A	

(72)発明者 西尾 譲司
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内

(72)発明者 太田 千春
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内