

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号
特開2014-175518
(P2014-175518A)

(43) 公開日 平成26年9月22日 (2014.9.22)

| | | |
|--------------------------------------|----------------------|-------------|
| (51) Int.Cl. | F I | テーマコード (参考) |
| HO 1 L 29/78 (2006.01) | HO 1 L 29/78 6 5 2 J | |
| HO 1 L 29/12 (2006.01) | HO 1 L 29/78 6 5 2 T | |
| HO 1 L 21/336 (2006.01) | HO 1 L 29/78 6 5 3 A | |
| | HO 1 L 29/78 6 5 2 H | |
| | HO 1 L 29/78 6 5 2 S | |
| 審査請求 未請求 請求項の数 7 O L (全 22 頁) 最終頁に続く | | |

| | | | |
|-----------|----------------------------|----------|---------------------|
| (21) 出願番号 | 特願2013-47790 (P2013-47790) | (71) 出願人 | 000002130 |
| (22) 出願日 | 平成25年3月11日 (2013.3.11) | | 住友電気工業株式会社 |
| | | | 大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号 |
| | | (74) 代理人 | 110001195 |
| | | | 特許業務法人深見特許事務所 |
| | | (72) 発明者 | 和田 圭司 |
| | | | 大阪市此花区島屋一丁目1番3号 住友電 |
| | | | 気工業株式会社大阪製作所内 |
| | | (72) 発明者 | 増田 健良 |
| | | | 大阪市此花区島屋一丁目1番3号 住友電 |
| | | | 気工業株式会社大阪製作所内 |
| | | (72) 発明者 | 日吉 透 |
| | | | 大阪市此花区島屋一丁目1番3号 住友電 |
| | | | 気工業株式会社大阪製作所内 |

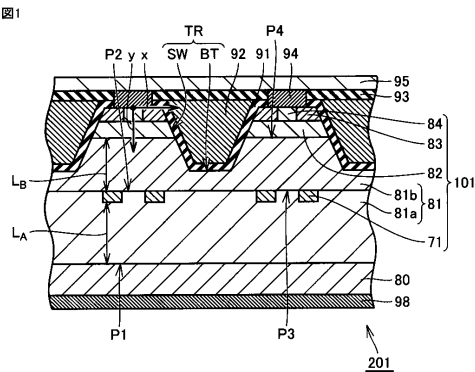
(54) 【発明の名称】 炭化珪素半導体装置

(57) 【要約】

【課題】高い耐圧と低いオン抵抗とを有する炭化珪素半導体装置を提供する。

【解決手段】第1のドリフト層81aは、第1の電極98に面しかつ第1の電極98に電氣的に接続された第1の面P1と、第1の面P1と反対の第2の面P2とを有する。第1のドリフト層81aは、不純物濃度 N_A を有する。緩和領域71は、第1のドリフト層81aの第2の面P2に部分的に設けられている。第1のドリフト層81aおよび第2のドリフト層81bは、緩和領域71を埋め込むドリフト領域81を構成している。第2のドリフト層81bは不純物濃度 N_B を有し、 $N_B > N_A$ が満たされている。ボディ領域82、ソース領域83および第2の電極94は第2のドリフト層81b上に設けられている。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

炭化珪素半導体装置であって、
第 1 の電極と、

前記第 1 の電極に面しかつ前記第 1 の電極に電氣的に接続された第 1 の面と前記第 1 の面と反対の第 2 の面とを有し、第 1 の導電型を有し、不純物濃度 N_A を有する第 1 のドリフト層と、

前記第 1 のドリフト層の前記第 2 の面に部分的に設けられ、前記第 1 の面から距離 L_A を有し、第 2 の導電型を有する緩和領域と、

前記第 2 の面に接する第 3 の面と前記第 3 の面と反対の第 4 の面とを有し、前記第 1 の導電型を有する第 2 のドリフト層とを備え、前記第 1 のドリフト層および前記第 2 のドリフト層は、前記緩和領域を埋め込むドリフト領域を構成しており、前記第 2 のドリフト層は不純物濃度 N_B を有し、 $N_B > N_A$ が満たされ、前記炭化珪素半導体装置はさらに

前記第 2 のドリフト層の前記第 4 の面上に設けられ、前記第 2 の導電型を有するボディ領域と、

前記ボディ領域上に設けられ、前記ボディ領域によって前記ドリフト領域から隔てられ、前記第 1 の導電型を有するソース領域と、

前記ソース領域に電氣的に接続された第 2 の電極と、

前記ソース領域および前記第 2 のドリフト層をつなぐように前記ボディ領域上に位置する部分を含むゲート絶縁膜と、

前記ゲート絶縁膜上に設けられたゲート電極とを備える、炭化珪素半導体装置。

【請求項 2】

前記第 3 の面は前記第 4 の面から距離 L_B を有し、 $L_A > L_B$ が満たされている、請求項 1 に記載の炭化珪素半導体装置。

【請求項 3】

$L_A > 2 \cdot L_B$ が満たされている、請求項 2 に記載の炭化珪素半導体装置。

【請求項 4】

$L_A > 5 \mu m$ が満たされている、請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載の炭化珪素半導体装置。

【請求項 5】

前記緩和領域はドーズ量 D_R を有し、 $L_A \cdot N_A < D_R$ が満たされている、請求項 1 ~ 4 のいずれか 1 項に記載の炭化珪素半導体装置。

【請求項 6】

前記ソース領域および前記ボディ領域を貫通して前記第 2 のドリフト層に至りかつ前記第 1 のドリフト層から離れた側壁面を有するトレンチが設けられており、

前記ゲート電極は前記ゲート絶縁膜を介して前記側壁面上に位置している、請求項 1 ~ 5 のいずれか 1 項に記載の炭化珪素半導体装置。

【請求項 7】

前記ソース領域、前記ボディ領域および前記第 2 のドリフト層の各々からなる部分を有しかつ前記第 2 のドリフト層の前記第 4 の面と平行な平坦面が設けられており、

前記ゲート電極は前記ゲート絶縁膜を介して前記平坦面上に位置している、請求項 1 ~ 5 のいずれか 1 項に記載の炭化珪素半導体装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は、炭化珪素半導体装置に関するものであり、特に、ドリフト領域を有する炭化珪素半導体装置に関するものである。

【背景技術】

【0002】

広く用いられている電力用半導体装置である Si (シリコン) MOSFET (Metal O

10

20

30

40

50

xide Semiconductor Field Effect Transistor) に関して、耐圧の主な決定要因は、耐圧保持領域をなすドリフト層が耐え得る電界強度の上限である。Si から作られたドリフト層は、 0.3 MV/cm 程度以上の電界が印加された箇所で破壊し得る。このため MOSFET のドリフト層全体において電界強度を所定の値未満に抑えることが必要である。最も単純な方法はドリフト層の不純物濃度を低くすることである。しかしながらこの方法では MOSFET のオン抵抗が大きくなるという短所がある。すなわちオン抵抗と耐圧との間にトレードオフ関係が存在する。

【0003】

特開平 9 - 191109 号公報において、典型的な Si MOSFET について、Si の物性値から得られる理論限界を考慮しつつ、オン抵抗と耐圧との間のトレードオフ関係の説明がなされている。そしてこのトレードオフを解消するために、ドレイン電極上の n 型基板の上の n ベース層中において、下側の p 型埋込層と、上側の p 型埋込層とを付加することが開示されている。下側の p 型埋込層および上側の埋込層によって n ベース層は、各々等しい厚さを有する下段と中段と上段とに区分される。この公報に記載の一実施の形態によれば、印加電圧が 200 V に達した時点でまず上段にパンチスルーが生じ、印加電圧が 400 V に達した時点でさらに中段にパンチスルーが生じ、印加電圧が 600 V に達した時点でさらに下段にパンチスルーが生じる。パンチスルーが生じた各段は等しい電圧を分担し、各段の最大電界が限界電界強度以下に保たれる。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献 1】特開平 9 - 191109 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

上述したトレードオフをより大きく改善するための方法として、近年、Si に代わり SiC (炭化珪素) を用いることが活発に検討されている。SiC は Si と異なり 0.4 MV/cm 以上の電界強度にも十分に耐え得る材料である。

【0006】

このように高い電界が印加され得る場合は、MOSFET 構造における特定位置での電界集中に起因した破壊が問題となる。たとえばトレンチ型 MOSFET の場合、トレンチの底部、特に角部、における、ゲート絶縁膜中での電界集中に起因したゲート絶縁膜の破壊現象が、耐圧の主な決定要因である。このように耐圧の決定要因が Si 半導体装置と SiC 半導体装置との間で異なる。このため、Si の使用を前提としていられる上記公報の技術を SiC 半導体装置の耐圧を向上させるために単純に適用したとすると、SiC の物性上の利点を十分に利用した耐圧の改善を行うことができない。

【0007】

本発明は、上記のような課題を解決するために成されたものであり、この発明の目的は、高い耐圧と低いオン抵抗とを有する炭化珪素半導体装置を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明の炭化珪素半導体装置は、第 1 の電極と、第 1 のドリフト層と、緩和領域と、第 2 のドリフト層と、ボディ領域と、ソース領域と、第 2 の電極と、ゲート絶縁膜と、ゲート電極とを有する。第 1 のドリフト層は、第 1 の電極に面しかつ第 1 の電極に電氣的に接続された第 1 の面と、第 1 の面と反対の第 2 の面とを有する。第 1 のドリフト層は、第 1 の導電型を有し、不純物濃度 N_A を有する。緩和領域は、第 1 のドリフト層の第 2 の面に部分的に設けられており、第 1 の面から距離 L_A を有する。緩和領域は第 2 の導電型を有する。第 2 のドリフト層は、第 2 の面に接する第 3 の面と、第 3 の面と反対の第 4 の面とを有する。第 2 のドリフト層は第 1 の導電型を有する。第 1 のドリフト層および第 2 のドリフト層は、緩和領域を埋め込むドリフト領域を構成している。第 2 のドリフト層は不純

10

20

30

40

50

物濃度 N_B を有し、 $N_B > N_A$ が満たされている。ボディ領域は第 2 のドリフト層の第 4 の面上に設けられている。ボディ領域は第 2 の導電型を有する。ソース領域は、ボディ領域上に設けられており、ボディ領域によってドリフト領域から隔てられている。ソース領域は第 1 の導電型を有する。第 2 の電極はソース領域に電氣的に接続されている。ゲート絶縁膜は、ソース領域および第 2 のドリフト層をつなぐようにボディ領域上に位置する部分を含む。ゲート電極はゲート絶縁膜上に設けられている。

【発明の効果】

【0009】

本発明によれば、高い耐圧と低いオン抵抗とを有する炭化珪素半導体装置が得られる。

【図面の簡単な説明】

10

【0010】

【図 1】本発明の実施の形態 1 における炭化珪素半導体装置の構成を概略的に示す部分断面図である。

【図 2】図 1 の炭化珪素半導体装置が有する炭化珪素層の形状を概略的に示す部分斜視図である。

【図 3】図 1 の炭化珪素半導体装置が有する炭化珪素層の形状を概略的に示す部分上面図である。

【図 4】図 1 の炭化珪素半導体装置の製造方法の第 1 工程を概略的に示す部分断面図である。

【図 5】図 1 の炭化珪素半導体装置の製造方法の第 2 工程を概略的に示す部分断面図である。

20

【図 6】図 1 の炭化珪素半導体装置の製造方法の第 3 工程を概略的に示す部分断面図である。

【図 7】図 1 の炭化珪素半導体装置の製造方法の第 4 工程を概略的に示す部分断面図である。

【図 8】図 1 の炭化珪素半導体装置の製造方法の第 5 工程を概略的に示す部分断面図である。

【図 9】図 1 の炭化珪素半導体装置の製造方法の第 6 工程を概略的に示す部分断面図である。

【図 10】図 1 の炭化珪素半導体装置の製造方法の第 7 工程を概略的に示す部分断面図である。

30

【図 11】図 1 の炭化珪素半導体装置の製造方法の第 8 工程を概略的に示す部分断面図である。

【図 12】図 1 の炭化珪素半導体装置の製造方法の第 9 工程を概略的に示す部分断面図である。

【図 13】図 1 の炭化珪素半導体装置の製造方法の第 10 工程を概略的に示す部分断面図である。

【図 14】図 1 の炭化珪素半導体装置の製造方法の第 11 工程を概略的に示す部分断面図である。

【図 15】炭化珪素半導体装置が有する炭化珪素層の表面の微細構造を概略的に示す部分断面図である。

40

【図 16】ポリタイプ 4 H の六方晶における (000 - 1) 面の結晶構造を示す図である。

【図 17】図 16 の線 X V I I - X V I I に沿う (11 - 20) 面の結晶構造を示す図である。

【図 18】図 15 の複合面の表面近傍における結晶構造を (11 - 20) 面内において示す図である。

【図 19】図 15 の複合面を (01 - 10) 面から見た図である。

【図 20】巨視的に見たチャンネル面および (000 - 1) 面の間の角度と、チャンネル移動度との関係の一例を、熱エッチングが行われた場合と行われなかった場合との各々につい

50

て示すグラフ図である。

【図 2 1】チャネル方向および $< 0 - 1 1 - 2 >$ 方向の間の角度と、チャネル移動度との関係の一例を示すグラフ図である。

【図 2 2】図 1 5 の変形例を示す図である。

【図 2 3】本発明の実施の形態 2 における炭化珪素半導体装置の構成を概略的に示す部分断面図である。

【図 2 4】距離 $L_A = 3 \mu m$ 、 $5 \mu m$ 、 $10 \mu m$ および $15 \mu m$ の各々の場合における、下部ドリフト層の不純物濃度 N_A と、耐圧との関係を例示するグラフ図である。

【発明を実施するための形態】

【0011】

10

以下、本発明の実施の形態について図に基づいて説明する。なお、以下の図面において、同一または相当する部分には同一の参照番号を付し、その説明は繰り返さない。また、本明細書中の結晶学的記載においては、個別方位を $[]$ 、集合方位を $< >$ 、個別面を $()$ 、集合面を $\{ \}$ でそれぞれ示している。また結晶学上の指数が負であることは、通常、 $-$ （バー）を数字の上に付すことによって表現されるが、本明細書中では数字の前に負の符号を付している。

【0012】

はじめに、実施の形態の概要について、以下の(i)~(vii)に記す。

(i) 炭化珪素半導体装置 201, 202 は、第 1 の電極 98 と、第 1 のドリフト層 81a と、緩和領域 71 と、第 2 のドリフト層 81b と、ボディ領域 82 と、ソース領域 83 と、第 2 の電極 94 と、ゲート絶縁膜 91 と、ゲート電極 92 とを有する。第 1 のドリフト層 81a は、第 1 の電極 98 に面しかつ第 1 の電極 98 に電氣的に接続された第 1 の面 P1 と、第 1 の面 P1 と反対の第 2 の面 P2 とを有する。第 1 のドリフト層 81a は、第 1 の導電型を有し、不純物濃度 N_A を有する。緩和領域 71 は、第 1 のドリフト層 81a の第 2 の面 P2 に部分的に設けられており、第 1 の面 P1 から距離 L_A を有する。緩和領域 71 は第 2 の導電型を有する。第 2 のドリフト層 81b は、第 2 の面 P2 に接する第 3 の面 P3 と、第 3 の面 P3 と反対の第 4 の面 P4 とを有する。第 2 のドリフト層 81b は第 1 の導電型を有する。第 1 のドリフト層 81a および第 2 のドリフト層 81b は、緩和領域 71 を埋め込むドリフト領域 81 を構成している。第 2 のドリフト層 81b は不純物濃度 N_B を有し、 $N_B > N_A$ が満たされている。ボディ領域 82 は第 2 のドリフト層 81b の第 4 の面 P4 上に設けられている。ボディ領域は第 2 の導電型を有する。ソース領域 83 は、ボディ領域 82 上に設けられており、ボディ領域 82 によってドリフト領域から隔てられている。ソース領域 83 は第 1 の導電型を有する。第 2 の電極 94 はソース領域 83 に電氣的に接続されている。ゲート絶縁膜 91 は、ソース領域 83 および第 2 のドリフト層 81b をつなぐようにボディ領域 82 上に位置する部分を含む。ゲート電極 92 はゲート絶縁膜 91 上に設けられている。

20

30

【0013】

この炭化珪素半導体装置 201, 202 によれば、 $N_B > N_A$ が満たされる。これにより、第 1 の電極 98 および第 2 の電極 94 の間に電圧が印加された際に、ボディ領域 82 から第 2 のドリフト層 81b への空乏層の伸展に比して、緩和領域 71 から第 1 のドリフト層 81a への空乏層の伸展の方が、より促進される。よって、印加電圧のうち大きな割合が第 1 のドリフト層 81a で負担される。よって、第 2 のドリフト層 81b において電界強度を抑制することができる。炭化珪素半導体装置の破壊は第 2 のドリフト層またはその上に設けられた構造において生じやすい。よって上述したように第 2 のドリフト層 81b において電界強度を抑制することで、炭化珪素半導体装置 201, 202 の耐圧を高めることができる。

40

【0014】

また $N_B > N_A$ の場合に比して第 2 のドリフト層 81b の不純物濃度が高いので、第 2 のドリフト層 81b の電気抵抗を低くすることができる。よって炭化珪素半導体装置 201, 202 のオン抵抗を低くすることができる。

50

【0015】

以上のように、高い耐圧と低いオン抵抗とを有する炭化珪素半導体装置201, 202が得られる。

【0016】

(ii) 第3の面P3が第4の面P4から距離 L_B を有し、 $L_A > L_B$ が満たされていてもよい。

【0017】

これにより第1のドリフト層により負担される電圧の割合を、より高めることができる。よって耐圧をより高めることができる。

【0018】

(iii) 上記(ii)において、 $L_A > 2 \cdot L_B$ が満たされていてもよい。

これにより第1のドリフト層81aにより負担される電圧の割合を、さらにより高めることができる。よって耐圧をより高めることができる。

【0019】

(iv) $L_A > 5 \mu m$ が満たされていてもよい。

これにより、緩和領域71と第1の面P1との間に、最大で $5 \mu m$ の長さを有する空乏層が形成され得る。言い換えれば、緩和領域71と第1の面P1との間に、十分な長さを有する空乏層が、より確実に形成され得る。よって炭化珪素半導体装置201, 202の耐圧をより高め得る。

【0020】

(v) 緩和領域71はドーズ量 D_R を有し、 $L_A \cdot N_A < D_R$ が満たされていてもよい。ここで「ドーズ量」とは単位面積当たりの不純物量を意味する。単位面積は、厚さ方向に垂直な面におけるものである。

【0021】

これにより、炭化珪素半導体装置201, 202がオフ状態とされることで第1の電極98と第2の電極94との間の電圧が高まった際に、緩和領域71から第1の面P1に向かって空乏層が十分に延びる前に緩和領域71が完全に空乏化してしまうことが防止される。これにより緩和領域71と第1の面P1との間で第1のドリフト層81a中に、十分な長さを有する空乏層が形成され得る。よって、第1の電極98と第2の電極94との間の電圧について、第1のドリフト層81aで負担される割合が高められる。言い換えれば、第2のドリフト層81bで負担される電圧が軽減される。これにより、電界集中によって破壊が生じやすい部分での電界強度をより抑制することができる。これにより炭化珪素半導体装置の耐圧がより高められる。

【0022】

(vi) 炭化珪素半導体装置201には、側壁面SWを有するトレンチTRが設けられていてもよい。側壁面SWは、ソース領域83およびボディ領域82を貫通して第2のドリフト層81bに至っている。また側壁面SWは第1のドリフト層81aから離れている。ゲート電極92はゲート絶縁膜91を介して側壁面SW上に位置している。

【0023】

このようなトレンチ型の炭化珪素半導体装置においては、第2のドリフト層中に至る側壁面SW端部の近傍でのゲート絶縁膜の破壊が、炭化珪素半導体装置の耐圧の決定要因となりやすい。このような場合であっても、上記(i)の特徴を有することで、オン抵抗を抑制しつつ、十分な耐圧を確保することができる。

【0024】

(vii) 炭化珪素半導体装置202には、ソース領域83P、ボディ領域82Pおよび第2のドリフト層81bの各々からなる部分を有しかつ第2のドリフト層81bの第4の面P4と平行な平坦面PFが設けられていてもよい。ゲート電極92Pはゲート絶縁膜91Pを介して平坦面PF上に位置している。

【0025】

このようなプレーナ型の炭化珪素半導体装置202においては、第2のドリフト層81

10

20

30

40

50

bとボディ領域82Pとの界面近傍での破壊が、炭化珪素半導体装置202の耐圧の決定要因となりやすい。このような場合であっても、上記(i)の特徴を有することで、オン抵抗を抑制しつつ、十分な耐圧を確保することができる。

【0026】

次に、本願発明の実施の形態のより詳細な説明として、以下に実施の形態1および2と補足事項とについて説明する。

【0027】

(実施の形態1)

図1～図3に示すように、本実施の形態のMOSFET201(炭化珪素半導体装置)は、単結晶基板80と、エピタキシャル層101(炭化珪素層)と、ゲート酸化膜91(ゲート絶縁膜)と、ゲート電極92と、層間絶縁膜93と、ソース電極94(第2の電極)と、ソース配線層95と、ドレイン電極98(第1の電極)とを有する。MOSFET201は、ドレイン電極98およびソース電極94の間で600V以上の耐圧を有することが好ましい。言い換えればMOSFET201は、高耐圧を有する電力用半導体装置であることが好ましい。

【0028】

単結晶基板80は、炭化珪素からなり、n型(第1の導電型)を有する。単結晶基板80の一方の面(図中、上面)上にはエピタキシャル層101が設けられ、他方の面(図中、下面)上にはオーミック電極としてのドレイン電極98が設けられている。単結晶基板80は、ポリタイプ4Hの六方晶の結晶構造を有することが好ましい。

【0029】

エピタキシャル層101は、単結晶基板80上にエピタキシャルに成長させられた炭化珪素層である。エピタキシャル層101は、ポリタイプ4Hの六方晶の結晶構造を有することが好ましい。エピタキシャル層101は、緩和領域71と、ドリフト領域81と、ボディ領域82と、ソース領域83と、コンタクト領域84を有する。

【0030】

ドリフト領域81はn型を有する。ドリフト領域81は下部ドリフト層81a(第1のドリフト層)および上部ドリフト層81b(第2のドリフト層)を有する。下部ドリフト層81aは、第1の面P1と、第1の面P1と反対の第2の面P2とを有する。第1の面P1は、ドレイン電極98に面しており、単結晶基板80を介してドレイン電極98に電氣的に接続されている。下部ドリフト層81aは、n型を有し、不純物濃度 N_A を有する。

【0031】

緩和領域71は、下部ドリフト層81aの第2の面P2に部分的に設けられており、第1の面P1から距離 L_A を有する。好ましくは $L_A > 5 \mu m$ が満たされている。緩和領域71は、p型(第2の導電型)を有し、不純物として、たとえばアルミニウムが添加されている。緩和領域71はドーズ量 D_R を有する。ここで「ドーズ量」とは単位面積当たりの不純物量を意味する。単位面積は、厚さ方向(図1における縦方向)に垂直な面におけるものである。言い換えれば、ドーズ量とは、単位体積当たりの不純物濃度を厚さ方向に積分した値である。好ましくは、 $L_A \cdot N_A < D_R$ が満たされている。緩和領域71のドーズ量は、好ましくは $1 \times 10^{12} cm^{-2}$ 以上であり、より好ましくは $1 \times 10^{13} cm^{-2}$ 以上である。またこのドーズ量は、好ましくは $1 \times 10^{15} cm^{-2}$ 以下である。このドーズ量は、たとえば $3 \times 10^{13} cm^{-2}$ である。

【0032】

上部ドリフト層81bは、下部ドリフト層81aの第2の面P2上に設けられている。上部ドリフト層81bは、第2の面P2に接する第3の面P3と、第3の面P3と反対の第4の面P4とを有する。第3の面P3は第4の面P4から距離 L_B を有する。言い換えれば、上部ドリフト層81bは厚さ L_B を有する。緩和領域71および第1の面P1の間の距離 L_A と、第3の面P3および第4の面P4の間の距離 L_B との間で、好ましくは $L_A > L_B$ が満たされており、より好ましくは $L_A > 2 \cdot L_B$ が満たされている。下部ドリフト

層 8 1 a および上部ドリフト層 8 1 b は、緩和領域 7 1 を埋め込むドリフト領域 8 1 を構成している。言い換えれば上部ドリフト層 8 1 b は緩和領域 7 1 を覆っている。上部ドリフト層 8 1 b は、n 型を有し、不純物濃度 N_B を有する。

【 0 0 3 3 】

下部ドリフト層 8 1 a の不純物濃度 N_A と上部ドリフト層 8 1 b の不純物濃度 N_B との間では、 $N_B > N_A$ の関係が満たされている。不純物濃度 N_A は、好ましくは $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以下であり、たとえば $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ である。不純物濃度 N_B は、好ましくは $7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以下であり、たとえば $7.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ である。単結晶基板 8 0 の不純物濃度は、不純物濃度 N_A よりも十分に大きいことが好ましく、たとえば 50 倍以上である。このような場合、単結晶基板 8 0 はドリフト領域としての機能、すなわち耐圧保持機能を実質的に有しない。

10

【 0 0 3 4 】

ボディ領域 8 2 は上部ドリフト層 8 1 b の第 4 の面 P 4 上に設けられている。ボディ領域は p 型を有する。ボディ領域 8 2 は上部ドリフト層 8 1 b によって緩和領域 7 1 から隔てられている。ボディ領域 8 2 の不純物濃度は、好ましくは $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以下であり、たとえば $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ である。

【 0 0 3 5 】

ソース領域 8 3 は、ボディ領域 8 2 上に設けられており、ボディ領域 8 2 によってドリフト領域から隔てられている。ソース領域は n 型を有する。ソース領域 8 3 はコンタクト領域 8 4 と共にエピタキシャル層 1 0 1 の上面をなしている。コンタクト領域 8 4 は p 型を有する。コンタクト領域 8 4 はボディ領域 8 2 につながっている。

20

【 0 0 3 6 】

M O S F E T には、エピタキシャル層 1 0 1 の上面にトレンチ T R が設けられている。トレンチ T R は側壁面 S W および底面 B T を有する。側壁面 S W は、ソース領域 8 3 およびボディ領域 8 2 を貫通して上部ドリフト層 8 1 b に至っている。これにより側壁面 S W は、ボディ領域 8 2 上において M O S F E T 2 0 1 のチャネル面を含む。側壁面 S W は下部ドリフト層 8 1 a から離れている。底面 B T は上部ドリフト層 8 1 b 上に位置している。本実施の形態においては底面 B T は上面とほぼ平行な平坦な形状を有する。底面 B T と側壁面 S W とがつながる部分はトレンチ T R の角部を構成している。本実施の形態においてはトレンチ T R は、平面視 (図 3) において、ハニカム構造を有する網目を構成するように延びている。これによりエピタキシャル層 1 0 1 は、トレンチ T R によって囲まれた、六角形状を有する上面を有する。側壁面 S W はエピタキシャル層 1 0 1 の上面に対して傾斜しており、これによりトレンチ T R は開口に向かってテーパ状に広がっている。側壁面 S W の面方位は、{ 0 0 0 1 } 面に対して 50° 以上 65° 以下傾斜していることが好ましく、(0 0 0 - 1) 面に対して 50° 以上 65° 以下傾斜していることがより好ましい。好ましくは側壁面 S W は、特にボディ領域 8 2 上の部分において、所定の結晶面 (特殊面とも称する) を有する。特殊面の詳細については後述する。

30

【 0 0 3 7 】

好ましくは緩和領域 7 1 は、図 3 に示すように、平面視においてトレンチ T R の底面 B T の外にのみ配置されている。本実施の形態においては、緩和領域 7 1 は、平面視において、開口部を有している。具体的には緩和領域 7 1 は、六角形状を有する上面とほぼ相似の外縁および開口部を有する。

40

【 0 0 3 8 】

ゲート酸化膜 9 1 は、トレンチ T R の側壁面 S W および底面 B T の各々を覆っている。これによりゲート酸化膜 9 1 は、ソース領域 8 3 および上部ドリフト層 8 1 b をつなぐようにボディ領域 8 2 上に位置する部分を含む。ゲート電極 9 2 はゲート酸化膜 9 1 上に設けられている。これによりゲート電極 9 2 はゲート酸化膜 9 1 を介して側壁面 S W 上に位置する部分を有する。

【 0 0 3 9 】

ソース電極 9 4 は、ソース領域 8 3 およびコンタクト領域 8 4 の各々に接することによ

50

り各々に電氣的に接続されている。ソース配線層 9 5 はソース電極 9 4 に接している。ソース配線層 9 5 は、たとえばアルミニウム層である。層間絶縁膜 9 3 はゲート電極 9 2 とソース配線層 9 5 との間を絶縁している。

【0040】

本実施の形態によれば、MOSFET 201 には、側壁面 SW を有するトレンチ TR が設けられている。側壁面 SW は、ソース領域 8 3 およびボディ領域 8 2 を貫通して上部ドリフト層 8 1 b に至っており、かつ下部ドリフト層 8 1 a から離れている。ゲート電極 9 2 はゲート酸化膜 9 1 を介して側壁面 SW 上に位置している。このようなトレンチ型の MOSFET 201 においては、下部ドリフト層 8 1 b 中に至る側壁面 SW 端部（トレンチ TR の角部）の近傍でのゲート絶縁膜 9 1 の破壊が、MOSFET 201 の耐圧の決定要因となりやすい。

10

【0041】

ここで下部ドリフト層 8 1 a の不純物濃度 N_A と上部ドリフト層 8 1 b の不純物濃度 N_B との間で $N_B > N_A$ が満たされていることにより、ドレイン電極 9 8 およびソース電極 9 4 の間に電圧が印加された際に、ボディ領域 8 2 から上部ドリフト層 8 1 b への空乏層の伸展に比して、緩和領域 7 1 から下部ドリフト層 8 1 a への空乏層の伸展の方が、より促進される。よって、印加電圧のうち大きな割合が下部ドリフト層 8 1 a で負担される。よって、上部ドリフト層 8 1 b において電界強度を抑制することができる。上述したように MOSFET 201 の破壊は下部ドリフト層 8 1 b 上のゲート絶縁膜 9 1 において生じやすい。よって上部ドリフト層 8 1 b において電界強度を抑制することで、MOSFET 201 の耐圧を高めることができる。

20

【0042】

また $N_B > N_A$ の場合に比して上部ドリフト層 8 1 b の不純物濃度が高いので、上部ドリフト層 8 1 b の電気抵抗を低くすることができる。よって MOSFET 201 のオン抵抗を低くすることができる。

【0043】

以上のように、高い耐圧と低いオン抵抗とを有する MOSFET 201 が得られる。

距離 L_A および L_B （図 1）の間で $L_A > L_B$ が満たされている場合、特に $L_A > 2 \cdot L_B$ が満たされている場合、下部ドリフト層 8 1 a により負担される電圧の割合を、より高めることができる。よって耐圧をより高めることができる。

30

【0044】

$L_A > 5 \mu m$ が満たされている場合、緩和領域 7 1 と第 1 の面 P 1 との間に、最大で $5 \mu m$ の長さを有する空乏層が形成され得る。言い換えれば、緩和領域 7 1 と第 1 の面 P 1 との間に、十分な長さを有する空乏層が、より確実に形成され得る。よって MOSFET 201 の耐圧をより高め得る。

【0045】

$L_A \cdot N_A < D_R$ が満たされている場合、MOSFET 201 がオフ状態とされることでドレイン電極 9 8 とソース電極 9 4 との間の電圧が高まった際に、緩和領域 7 1 から第 1 の面 P 1 に向かって空乏層が十分に延びる前に緩和領域 7 1 が完全に空乏化してしまうことが防止される。これにより緩和領域 7 1 と第 1 の面 P 1 との間で下部ドリフト層 8 1 a 中に、十分な長さを有する空乏層が形成され得る。よって、ドレイン電極 9 8 とソース電極 9 4 との間の電圧について、下部ドリフト層 8 1 a で負担される割合が高められる。言い換えれば、上部ドリフト層 8 1 b で負担される電圧が軽減される。これにより、電界集中によって破壊が生じやすい部分での電界強度をより抑制することができる。これにより MOSFET 201 の耐圧がより高められる。

40

【0046】

また下部ドリフト層 8 1 a とドレイン電極 9 8 との電氣的接続が、不純物濃度 N_A より高い不純物濃度を有する単結晶基板 8 0 を介して行なわれる。よってドレイン電極 9 8 の接触抵抗を小さくすることができる。よってその分だけドリフト領域 8 1 の電気抵抗を大きくし得る。よってドリフト領域 8 1 の不純物濃度をより低くし得る。よって MOSFET

50

T 2 0 1 の耐圧をより高め得る。

【 0 0 4 7 】

緩和領域 7 1 が平面視 (図 3) においてトレンチ T R の底面 B T の外に配置されている場合、M O S F E T 2 0 1 がオフ状態にある場合に、トレンチ T R の底面 B T の縁に位置するトレンチ T R の角部に向かって、緩和領域 7 1 から空乏層が延びる。よって電界緩和構造の効果をより高めることができる。

【 0 0 4 8 】

次に M O S F E T 2 0 1 (図 1) の製造方法について、以下に説明する。

図 4 に示すように、下部ドリフト層 8 1 a が単結晶基板 8 0 上に形成される。具体的には、単結晶基板 8 0 上におけるエピタキシャル成長によって下部ドリフト層 8 1 a が形成される。このエピタキシャル成長は、たとえば原料ガスとしてシラン (SiH_4) とプロパン (C_3H_8) との混合ガスを用い、キャリアガスとしてたとえば水素ガス (H_2) を用いた C V D (Chemical Vapor Deposition) 法により行うことができる。この際、不純物として、たとえば窒素 (N) やリン (P) を導入することが好ましい。

【 0 0 4 9 】

図 5 に示すように、下部ドリフト層 8 1 a の第 2 の面 P 2 の一部の上に、p 型を有する緩和領域 7 1 が形成される。具体的には、第 2 の面 P 2 上において、注入マスク (図示せず) を用いたアクセプタイオン (第 2 の導電型を付与するための不純物イオン) の注入が行われる。

【 0 0 5 0 】

図 6 に示すように、緩和領域 7 1 が形成された後に第 2 の面 P 2 上に、n 型を有する上部ドリフト層 8 1 b が形成される。これにより緩和領域 7 1 は、下部ドリフト層 8 1 a および上部ドリフト層 8 1 b によって構成されるドリフト領域 8 1 に埋め込まれる。上部ドリフト層 8 1 b は下部ドリフト層 8 1 a の形成方法と同様の方法によって形成され得る。

【 0 0 5 1 】

図 7 に示すように、上部ドリフト層 8 1 b の第 4 の面 P 4 上にボディ領域 8 2 およびソース領域 8 3 が形成される。図 8 に示すように、ボディ領域 8 2 上にコンタクト領域 8 4 が形成される。これらの形成は、たとえば上部ドリフト層 8 1 b の第 4 の面 (図 6) 上へのイオン注入により行い得る。ボディ領域 8 2 およびコンタクト領域 8 4 を形成するためのイオン注入においては、たとえばアルミニウム (A l) などの、p 型を付与するための不純物がイオン注入される。またソース領域 8 3 を形成するためのイオン注入においては、たとえばリン (P) などの、n 型を付与するための不純物がイオン注入される。なおイオン注入の代わり、不純物の添加をとまなうにエピタキシャル成長が用いられてもよい。

【 0 0 5 2 】

次に、不純物を活性化するための熱処理が行われる。この熱処理の温度は、好ましくは 1 5 0 0 以上 1 9 0 0 以下であり、たとえば 1 7 0 0 程度である。熱処理の時間は、たとえば 3 0 分程度である。熱処理の雰囲気は、好ましくは不活性ガス雰囲気であり、たとえば A r 雰囲気である。

【 0 0 5 3 】

図 9 に示すように、ソース領域 8 3 およびコンタクト領域 8 4 からなる面上に、開口部を有するマスク層 4 0 が形成される。マスク層 4 0 として、たとえばシリコン酸化膜などを用いることができる。開口部はトレンチ T R (図 1) の位置に対応して形成される。

【 0 0 5 4 】

図 1 0 に示すように、マスク層 4 0 の開口部において、ソース領域 8 3 と、ボディ領域 8 2 と、上部ドリフト層 8 1 b の一部とがエッチングにより除去される。エッチングの方法としては、たとえば反応性イオンエッチング (R I E) 、特に誘導結合プラズマ (I C P) R I E を用いることができる。具体的には、たとえば反応ガスとして SF_6 または SF_6 と O_2 との混合ガスを用いた I C P - R I E を用いることができる。このようなエッチングにより、トレンチ T R (図 1) が形成されるべき領域に、上面に対してほぼ垂直な側壁を有する凹部 T Q が形成される。

10

20

30

40

50

【 0 0 5 5 】

次に、凹部 T Q において熱エッチングが行われる。熱エッチングは、たとえば、少なくとも 1 種類以上のハロゲン原子を有する反応性ガスを含む雰囲気中での加熱によって行い得る。少なくとも 1 種類以上のハロゲン原子は、塩素 (C l) 原子およびフッ素 (F) 原子の少なくともいずれかを含む。この雰囲気は、たとえば、 $C l_2$ 、 $B C l_3$ 、 $S F_6$ 、または $C F_4$ である。たとえば、塩素ガスと酸素ガスとの混合ガスを反応ガスとして用い、熱処理温度を、たとえば 7 0 0 以上 1 0 0 0 以下として、熱エッチングが行われる。

【 0 0 5 6 】

なお、反応ガスは、上述した塩素ガスと酸素ガスとに加えて、キャリアガスを含んでもよい。キャリアガスとしては、たとえば窒素 (N_2) ガス、アルゴンガス、ヘリウムガスなどを用いることができる。そして、上述のように熱処理温度を 7 0 0 以上 1 0 0 0 以下とした場合、S i C のエッチング速度はたとえば約 7 0 μm / 時になる。また、この場合に、酸化珪素から作られたマスク層 4 0 は、S i C に対する選択比が極めて大きいので、S i C のエッチング中に実質的にエッチングされない。

【 0 0 5 7 】

図 1 1 に示すように、上記の熱エッチングにより、エピタキシャル層 1 0 1 の上面上にトレンチ T R が形成される。好ましくは、トレンチ T R の形成時、側壁面 S W 上、特にボディ領域 8 2 上において、特殊面が自己形成される。次にマスク層 4 0 がエッチングなど任意の方法により除去される。

【 0 0 5 8 】

図 1 2 に示すように、トレンチ T R の側壁面 S W および底面 B T の各々を覆うゲート酸化膜 9 1 が形成される。ゲート酸化膜 9 1 は、たとえば熱酸化により形成され得る。この後に、雰囲気ガスとして一酸化窒素 (N O) ガスを用いる N O アニールが行われてもよい。温度プロファイルは、たとえば、温度 1 1 0 0 以上 1 3 0 0 以下、保持時間 1 時間程度の条件を有する。これにより、ゲート酸化膜 9 1 とボディ領域 8 2 との界面領域に窒素原子が導入される。その結果、界面領域における界面準位の形成が抑制されることで、チャネル移動度を向上させることができる。なお、このような窒素原子の導入が可能であれば、N O ガス以外のガスが雰囲気ガスとして用いられてもよい。この N O アニールの後にさらに、雰囲気ガスとしてアルゴン (A r) を用いる A r アニールが行われてもよい。A r アニールの加熱温度は、上記 N O アニールの加熱温度よりも高く、ゲート酸化膜 9 1 の融点よりも低いことが好ましい。この加熱温度が保持される時間は、たとえば 1 時間程度である。これにより、ゲート酸化膜 9 1 とボディ領域 8 2 との界面領域における界面準位の形成がさらに抑制される。なお、雰囲気ガスとして、A r ガスに代えて窒素ガスなどの他の不活性ガスが用いられてもよい。

【 0 0 5 9 】

図 1 3 に示すように、ゲート酸化膜 9 1 上にゲート電極 9 2 が形成される。具体的には、トレンチ T R の内部の領域をゲート酸化膜 9 1 を介して埋めるように、ゲート酸化膜 9 1 上にゲート電極 9 2 が形成される。ゲート電極 9 2 の形成方法は、たとえば、導体またはドーパントポリシリコンの成膜と C M P (Chemical Mechanical Polishing) とによって行い得る。

【 0 0 6 0 】

図 1 4 を参照して、ゲート電極 9 2 の露出面を覆うように、ゲート電極 9 2 およびゲート酸化膜 9 1 上に層間絶縁膜 9 3 が形成される。層間絶縁膜 9 3 およびゲート酸化膜 9 1 に開口部が形成されるようにエッチングが行われる。この開口部により上面においてソース領域 8 3 およびコンタクト領域 8 4 の各々が露出される。次に上面においてソース領域 8 3 およびコンタクト領域 8 4 の各々に接するソース電極 9 4 が形成される。ドリフト領域 8 1 からなる第 1 の面 P 1 上に、単結晶基板 8 0 を介して、ドレイン電極 9 8 が形成される。

【 0 0 6 1 】

再び図 1 を参照して、ソース配線層 9 5 が形成される。これにより、M O S F E T 2 0

10

20

30

40

50

1 が得られる。

【0062】

(特殊面)

上述した側壁面 S W は、特にボディ領域 8 2 上の部分において、特殊面を有する。特殊面を有する側壁面 S W は、図 1 5 に示すように、面方位 { 0 - 3 3 - 8 } を有する面 S 1 を含む。言い換えれば、トレンチ T R の側壁面 S W 上においてボディ領域 8 2 には、面 S 1 を含む表面が設けられている。面 S 1 は好ましくは面方位 (0 - 3 3 - 8) を有する。

【0063】

より好ましくは、側壁面 S W は面 S 1 を微視的に含み、側壁面 S W はさらに、面方位 { 0 - 1 1 - 1 } を有する面 S 2 を微視的に含む。ここで「微視的」とは、原子間隔の 2 倍程度の寸法を少なくとも考慮する程度に詳細に、ということの意味する。このように微視的な構造の観察方法としては、たとえば T E M (Transmission Electron Microscope) を用いることができる。面 S 2 は好ましくは面方位 (0 - 1 1 - 1) を有する。

【0064】

好ましくは、側壁面 S W の面 S 1 および面 S 2 は、面方位 { 0 - 1 1 - 2 } を有する複合面 S R を構成している。すなわち複合面 S R は、面 S 1 および S 2 が周期的に繰り返されることによって構成されている。このような周期的構造は、たとえば、T E M または A F M (Atomic Force Microscopy) により観察し得る。この場合、複合面 S R は { 0 0 0 - 1 } 面に対して巨視的に 6 2 ° のオフ角を有する。ここで「巨視的」とは、原子間隔程度の寸法を有する微細構造を無視することの意味する。このように巨視的なオフ角の測定としては、たとえば、一般的な X 線回折を用いた方法を用い得る。好ましくは複合面 S R は面方位 (0 - 1 1 - 2) を有する。この場合、複合面 S R は (0 0 0 - 1) 面に対して巨視的に 6 2 ° のオフ角を有する。

【0065】

好ましくは、チャンネル面上においてキャリアが流れる方向 (すなわち M O S F E T の厚さ方向 (図 1 などにおける縦方向)) であるチャンネル方向 C D は、上述した周期的繰り返しが行われる方向に沿っている。

【0066】

次に複合面 S R の詳細な構造について説明する。

一般に、ポリタイプ 4 H の炭化珪素単結晶を (0 0 0 - 1) 面から見ると、図 1 6 に示すように、S i 原子 (または C 原子) は、A 層の原子 (図中の実線) と、この下に位置する B 層の原子 (図中の破線) と、この下に位置する C 層の原子 (図中の一点鎖線) と、この下に位置する B 層の原子 (図示せず) とが繰り返し設けられている。つまり 4 つの層 A B C B を 1 周期として A B C B A B C B A B C B . . . のような周期的な積層構造が設けられている。

【0067】

図 1 7 に示すように、(1 1 - 2 0) 面 (図 1 6 の線 X V I I - X V I I の断面) において、上述した 1 周期を構成する 4 つの層 A B C B の各層の原子は、(0 - 1 1 - 2) 面に完全に沿うようには配列されていない。図 1 7 においては B 層の原子の位置を通るように (0 - 1 1 - 2) 面が示されており、この場合、A 層および C 層の各々の原子は (0 - 1 1 - 2) 面からずれていることがわかる。このため、炭化珪素単結晶の表面の巨視的な面方位、すなわち原子レベルの構造を無視した場合の面方位が (0 - 1 1 - 2) に限定されたとしても、この表面は、微視的には様々な構造をとり得る。

【0068】

図 1 8 に示すように、複合面 S R は、面方位 (0 - 3 3 - 8) を有する面 S 1 と、面 S 1 につながりかつ面 S 1 の面方位と異なる面方位を有する面 S 2 とが交互に設けられることによって構成されている。面 S 1 および面 S 2 の各々の長さは、S i 原子 (または C 原子) の原子間隔の 2 倍である。なお面 S 1 および面 S 2 が平均化された面は、(0 - 1 1 - 2) 面 (図 1 7) に対応する。

【0069】

10

20

30

40

50

図 19 に示すように、複合面 S R を (0 1 - 1 0) 面から見て単結晶構造は、部分的に見て立方晶と等価な構造 (面 S 1 の部分) を周期的に含んでいる。具体的には複合面 S R は、上述した立方晶と等価な構造における面方位 (0 0 1) を有する面 S 1 と、面 S 1 につながりかつ面 S 1 の面方位と異なる面方位を有する面 S 2 とが交互に設けられることによって構成されている。このように、立方晶と等価な構造における面方位 (0 0 1) を有する面 (図 24 においては面 S 1) と、この面につながりかつこの面方位と異なる面方位を有する面 (図 16 においては面 S 2) とによって表面を構成することは 4 H 以外のポリタイプにおいても可能である。ポリタイプは、たとえば 6 H または 1 5 R であってもよい。

【 0 0 7 0 】

10

次に図 20 を参照して、側壁面 S W の結晶面と、チャンネル面の移動度 M B との関係について説明する。図 20 のグラフにおいて、横軸は、チャンネル面を有する側壁面 S W の巨視的な面方位と (0 0 0 - 1) 面とのなす角度 D 1 を示し、縦軸は移動度 M B を示す。プロット群 C M は側壁面 S W が熱エッチングによる特殊面として仕上げられた場合に対応し、プロット群 M C はそのような熱エッチングがなされない場合に対応する。

【 0 0 7 1 】

プロット群 M C における移動度 M B は、チャンネル面の表面の巨視的な面方位が (0 - 3 3 - 8) のときに最大となった。この理由は、熱エッチングが行われない場合、すなわち、チャンネル表面の微視的な構造が特に制御されない場合においては、巨視的な面方位が (0 - 3 3 - 8) とされることによって、微視的な面方位 (0 - 3 3 - 8) 、つまり原子レベルまで考慮した場合の面方位 (0 - 3 3 - 8) が形成される割合が確率的に高くなったためと考えられる。

20

【 0 0 7 2 】

一方、プロット群 C M における移動度 M B は、チャンネル面の表面の巨視的な面方位が (0 - 1 1 - 2) のとき (矢印 E X) に最大となった。この理由は、図 18 および図 19 に示すように、面方位 (0 - 3 3 - 8) を有する多数の面 S 1 が面 S 2 を介して規則正しく稠密に配置されることで、チャンネル面の表面において微視的な面方位 (0 - 3 3 - 8) が占める割合が高くなったためと考えられる。

【 0 0 7 3 】

なお移動度 M B は複合面 S R 上において方位依存性を有する。図 21 に示すグラフにおいて、横軸はチャンネル方向と < 0 - 1 1 - 2 > 方向との間の角度 D 2 を示し、縦軸はチャンネル面の移動度 M B (任意単位) を示す。破線はグラフを見やすくするために補助的に付してある。このグラフから、チャンネル移動度 M B を大きくするには、チャンネル方向 C D (図 15) が有する角度 D 2 は、0 ° 以上 6 0 ° 以下であることが好ましく、ほぼ 0 ° であることがより好ましいことがわかった。

30

【 0 0 7 4 】

図 22 に示すように、側壁面 S W は複合面 S R に加えてさらに面 S 3 を含んでもよい。より具体的には、面 S 3 および複合面 S R が周期的に繰り返されることによって構成された複合面 S Q を側壁面 S W が含んでもよい。この場合、側壁面 S W の { 0 0 0 - 1 } 面に対するオフ角は、理想的な複合面 S R のオフ角である 6 2 ° からずれる。このずれは小さいことが好ましく、± 1 0 ° の範囲内であることが好ましい。このような角度範囲に含まれる表面としては、たとえば、巨視的な面方位が { 0 - 3 3 - 8 } 面となる表面がある。より好ましくは、側壁面 S W の (0 0 0 - 1) 面に対するオフ角は、理想的な複合面 S R のオフ角である 6 2 ° からずれる。このずれは小さいことが好ましく、± 1 0 ° の範囲内であることが好ましい。このような角度範囲に含まれる表面としては、たとえば、巨視的な面方位が (0 - 3 3 - 8) 面となる表面がある。

40

【 0 0 7 5 】

このような周期的構造は、たとえば、T E M または A F M により観察し得る。

(実施の形態 2)

図 23 に示すように、本実施の形態の M O S F E T 2 0 2 は、いわゆるプレーナ型であ

50

る。エピタキシャル層 102 は、ボディ領域 82P、ソース領域 83P およびコンタクト領域 84P を含む。MOSFET 202 には平坦面 PF が設けられている。平坦面 PF は、ソース領域 83P、ボディ領域 82P および上部ドリフト層 81b の各々からなる部分を有し、かつ上部ドリフト層 81b の第 4 の面 P4 と平行である。ゲート電極 92P はゲート酸化膜 91P を介して平坦面 PF 上に位置している。なお、上記以外の構成については、上述した実施の形態 1 の構成とほぼ同じであるため、同一または対応する要素について同一の符号を付し、その説明を繰り返さない。

【0076】

本実施の形態においては、下部ドリフト層 81b とボディ領域 82P との界面（特に角部 CR）の近傍での破壊が、MOSFET 202 の耐圧の決定要因となりやすい。このような場合であっても、実施の形態 1 とほぼ同様の理由により、オン抵抗を抑制しつつ、十分な耐圧を確保することができる。

10

【0077】

（不純物濃度 N_A および距離 L_d と、耐圧との関係について）

図 24 のシミュレーション結果に示すように、緩和領域 71 の完全空乏化が生じない程度に緩和領域の不純物ドーザ量が十分に高い場合、緩和領域 71 および下部ドリフト層 81a の界面の耐圧は主に、下部ドリフト層 81a の不純物濃度 N_A 、および緩和領域 71 と第 1 の面 P1 との間の距離 L_A によって決まる。この耐圧は、シリコン半導体装置においては 600V 程度（図中、破線参照）が上限となる。炭化珪素半導体装置においては、 $L_A = 5\mu m$ の場合、600V 以上の耐圧が得られた。

20

【0078】

（実施例 1）

MOSFET 201（図 1）について、不純物濃度 N_A 、 N_B と、距離 L_A 、 L_B とを変化させて、電界強度およびオン抵抗 R_{ON} のシミュレーション 1～5 を行なった。なおシミュレーション 1 は、不純物濃度 N_A 、 N_B が互いに同一とされた比較例である。結果を以下に示す。

【0079】

【表 1】

| # | N_A [cm^{-3}] | L_A [μm] | N_B [cm^{-3}] | L_B [μm] | $E_{fp/n}$ [MV/cm] | E_{trench} [MV/cm] | E_{ox} [MV/cm] | E_{pn} [MV/cm] | R_{on} [$\text{mohm}\cdot\text{cm}^2$] |
|---|-------------------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|---|
| 1 | 4.5×10^{15} | 9 | 4.5×10^{15} | 9 | 2.5 | 1.07 | 3.53 | 0.16 | 9.27 |
| 2 | 4.5×10^{15} | 9 | 5.5×10^{15} | 3 | 2.5 | 1.12 | 3.73 | 0.16 | 3.25 |
| 3 | 4.5×10^{15} | 9 | 7.0×10^{15} | 3 | 2.55 | 1.16 | 3.9 | 0.17 | 2.95 |
| 4 | 4.5×10^{15} | 9 | 1.0×10^{16} | 3 | 2.6 | 1.22 | 4.04 | 0.17 | 2.75 |
| 5 | 4.5×10^{15} | 9 | 2.0×10^{16} | 3 | 2.7 | 1.5 | 4.4 | 0.18 | 2.50 |

【0080】

ここで、「 $E_{fp/n}$ 」は緩和領域71と下部ドリフト層81aとの界面近傍の最大電界強度、「 E_{trench} 」はトレンチTRにおける最大電界強度、「 E_{ox} 」はゲート酸化膜91での最大電界強度、「 E_{pn} 」はボディ領域82と上部ドリフト層81bとの界面近傍の最大電界強度である。

【0081】

MOSFET201においては、緩和領域71が設けられることで E_{ox} が効果的に抑制される一方で、 $E_{fp/n}$ が過度に高くないように留意する必要がある。シミュレーション1（比較例）とシミュレーション2（実施例）の間では、 $E_{fp/n}$ を同程度に抑えつつ、後者（実施例）の方がオン抵抗 R_{ON} が抑制されていた。シミュレーション3～5に示すように、不純物濃度 N_B を高めたところ、オン抵抗 R_{ON} はさらに抑制された。

【 0 0 8 2 】

(実施例 2)

上記と同様のシミュレーションを MOSFET 202 (図 23) についても行なった。
その結果を以下に示す。

【 0 0 8 3 】

【 表 2 】

| # | N_A [cm^{-3}] | L_A [μm] | N_B [cm^{-3}] | L_B [μm] | E_{fp}/n [MV/cm] | E_{pn} [MV/cm] | R_{on} [$\text{mohm}\cdot\text{cm}^2$] |
|---|-------------------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------|---|
| 1 | 4.5×10^{15} | 9 | 4.5×10^{15} | 9 | 1.67 | 1.28 | 7.66 |
| 2 | 4.5×10^{15} | 9 | 7.0×10^{15} | 3 | 1.98 | 1.32 | 4.06 |

10

【 0 0 8 4 】

シミュレーション 1 (比較例) とシミュレーション 2 (実施例) との間では、後者 (実施例) の方がオン抵抗 R_{ON} が抑制されていた。

【 0 0 8 5 】

今回開示された実施の形態および実施例はすべての点で例示であって制限的なものではないと考えられるべきである。本発明の範囲は上記した説明ではなくて特許請求の範囲によって示され、特許請求の範囲と均等の意味および範囲内でのすべての変更が含まれることが意図される。たとえば、トレンチは平坦な底面を有するものに限定されるものではなく、その断面形状が U 字状または V 字状であってもよい。また炭化珪素半導体装置は MOSFET に限定されるものではなく、たとえば IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) であってもよい。この場合、上述したソース電極、ソース領域およびドレイン電極のそれぞれは、エミッタ電極、エミッタ領域およびコレクタ電極としての機能を有する。また上記各実施の形態においては第 1 の導電型が n 型であり第 2 の導電型が p 型であるが、これらの導電型が入れ替えられもよい。この場合、上記説明におけるドナーおよびアクセプタも入れ替えられる。なお、より高いチャネル移動度を得るためには、第 1 導電型が n 型であることが好ましい。また炭化珪素半導体装置は、必ずしも単結晶基板を有する必要はなく、単結晶基板が省略されてもよい。

20

30

【 符号の説明 】

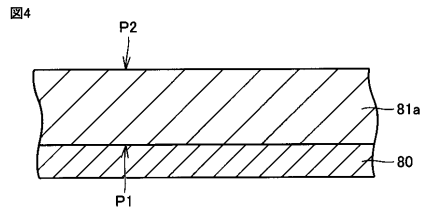
【 0 0 8 6 】

- 7 1 緩和領域
- 8 0 単結晶基板
- 8 1 ドリフト領域
- 8 1 a 上部ドリフト層 (第 1 のドリフト層)
- 8 1 b 下部ドリフト層 (第 2 のドリフト層)
- 8 2 , 8 2 P ボディ領域
- 8 3 , 8 3 P ソース領域
- 8 4 , 8 4 P コンタクト領域
- 9 1 , 9 1 P ゲート酸化膜 (ゲート絶縁膜)
- 9 2 , 9 2 P ゲート電極
- 9 3 層間絶縁膜
- 9 4 ソース電極
- 9 5 ソース配線層
- 9 8 ドレイン電極 (第 1 の電極)
- 9 4 ソース電極 (第 2 の電極)
- 1 0 1 , 1 0 2 エピタキシャル層
- 2 0 1 , 2 0 2 MOSFET (炭化珪素半導体装置)
- B T 底面

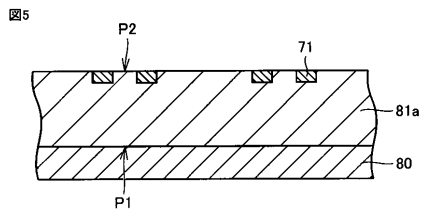
40

50

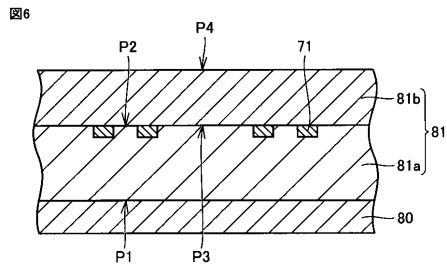
【図 4】



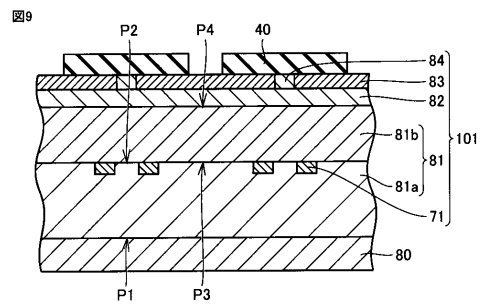
【図 5】



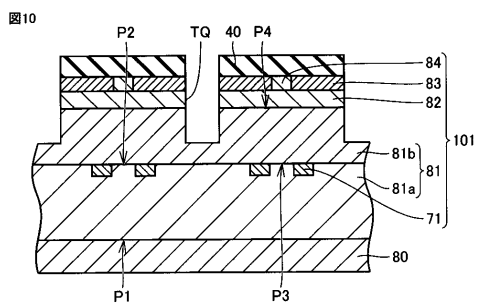
【図 6】



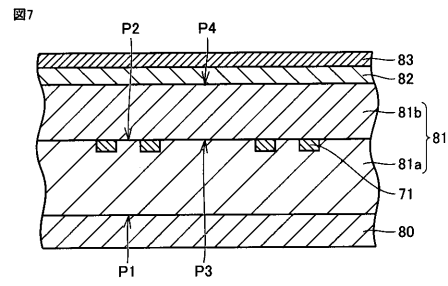
【図 9】



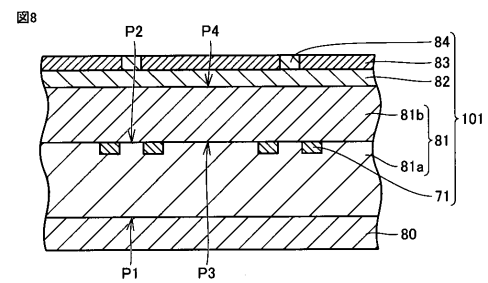
【図 10】



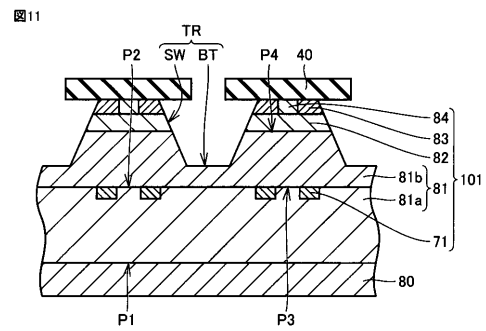
【図 7】



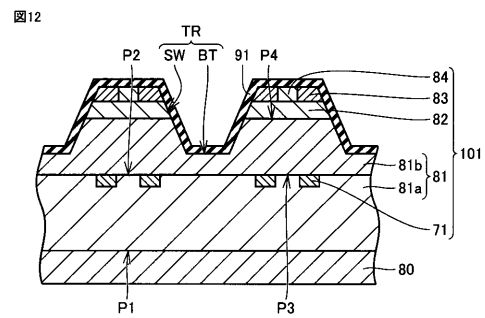
【図 8】



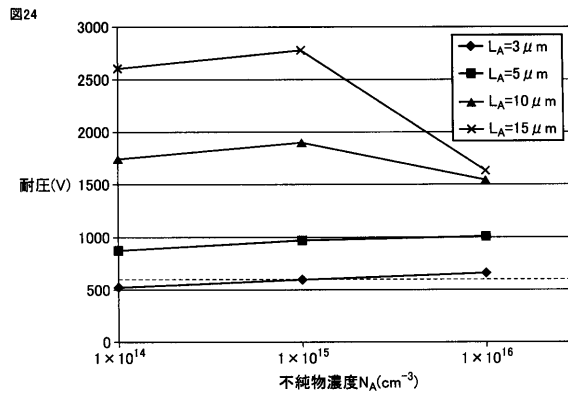
【図 11】



【図 12】



【 図 2 4 】



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 | 29/78 | 6 5 2 F |
| H 0 1 L | 29/78 | 6 5 8 G |
| H 0 1 L | 29/78 | 6 5 8 F |