

氏 名	ね 根 来 佑 樹
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2522 号
学位授与の日付	平 成 17 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 電 子 物 性 工 学 専 攻
学位論文題目	Ion Implantation and Embedded Epitaxial Growth for 4H-SiC Power Electronic Devices (4H-SiC パワーデバイスのためのイオン注入と埋め込みエピタキシャル成長)
論文調査委員	(主 査) 教 授 鈴 木 実 教 授 野 田 進 教 授 藤 田 静 雄

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、広禁制帯幅半導体 SiC(シリコンカーバイド)を用いた高耐圧・低損失の超接合パワーデバイスの実現を目指して、イオン注入による広範囲伝導性制御と埋め込みエピタキシャル成長による超接合構造の作製に関する研究をまとめたものであり、7章からなっている。

第1章は序論であり、最初に SiC の物性を他の半導体材料と比較し、この半導体が電力変換用パワーデバイス等の応用分野で有望であることを論じている。次に、当該分野における最近の研究動向を述べた後、SiC パワーデバイス性能をさらに飛躍的に向上させるには、耐圧維持層に多重 pn 接合を用いた SiC 超接合デバイスが魅力的であることを述べている。超接合デバイスでは多重 pn 接合において空乏層を二次元的に広げることで耐圧を保持するものであり、耐圧保持層に高濃度の不純物ドーピングが可能になるため、従来のデバイスよりも桁違いに直列抵抗を低減できることを述べている。次に、超接合デバイスの実現に必要なプロセス技術の問題を整理し、本研究の位置付けを明らかにしている。特に、SiC への高濃度イオン注入による低抵抗層の形成、良好な pn 接合の形成、多重 pn 接合からなる超接合構造の作製技術の重要性について論じた後、本研究の目的と論文の構成を述べている。

第2章では、超接合デバイスの n 型コンタクト領域形成に必要な低抵抗 n 型 SiC 層の作製について述べている。ドナー型不純物であるリン(P)イオン注入による高濃度ドーピング n 型 SiC の形成に取り組み、高温イオン注入や高温熱処理によってイオン注入損傷を低減し、高い電気的活性化率を得ている。フォトレジストを炭化させたカーボン膜によって表面を被覆することによって、良好な表面平坦性を維持しながら従来より約2倍優れる抵抗率を実現している。また、高濃度ドーピング層の電気的性質を低温から高温の広い温度範囲で評価し、伝導機構について議論している。特に SiC(11 $\bar{2}$ 0) 面では、室温イオン注入でも十分な低抵抗層を形成できることを見出している。ラザフォード後方散乱や透過電子顕微鏡観察により、SiC(11 $\bar{2}$ 0) 面では室温注入によって非晶質層が形成されても、その後の熱処理時に異種結晶構造混入のない良好な再結晶化が進行するためであることを明らかにしている。

第3章は、超接合デバイスの p 型コンタクト領域形成に必要な低抵抗 p 型 SiC 層の作製について述べている。アクセプタ型不純物であるアルミ (Al) イオン注入による高濃度ドーピング p 型 SiC の形成に取り組み、注入条件や熱処理条件による注入層の物性の違いを論じている。高温短時間の熱処理や C イオン共注入によって、従来より約3倍優れた低抵抗層の形成を達成している。また、Al イオン注入においても SiC(11 $\bar{2}$ 0) 面の有効性を確認している。高濃度ドーピング p 型 SiC のキャリア密度、抵抗率の理論予測を行い、実験値との差異を議論している。

第4章は、超接合デバイスの耐圧維持に必要なイオン注入による pn 接合の作製について述べている。n 型 SiC エピタキシャル成長層に Al あるいはホウ素(B)のイオン注入を行い、耐圧1~3kV の SiC pn 接合ダイオードを実現している。pn 接合の電流-電圧特性の温度依存性から電流伝導機構、絶縁破壊機構を調べ、イオン注入分布が pn 接合特性に与える影響を論じている。pn 接合の容量-電圧特性を解析する独自のモデルを提案し、接合界面近傍のドーピング密度分布が注入イ

オン種によって大きく異なることを明らかにしている。また、自作の高品質結晶と高温熱処理技術の採用によって、温度上昇と共に耐圧が増大するアバランシェ破壊特性を得るという特筆すべき性能を実現している。実デバイスで重要となるアノード領域端部における電界集中を緩和するため、局所的に p 型イオン注入領域を形成する効果についても論じている。

第 5 章は、超接合デバイスにおける pn 接合の基礎研究に取り組み、Al および B のイオン注入層における注入不純物とアクセプタ密度の深さ方向分布を精密に評価している。Al イオン注入層では、高温熱処理によってほぼ完全な電気的活性化率 (>95%) が得られ、点欠陥密度がアクセプタ密度よりも約 3 桁小さいことを示している。一方、B イオン注入層では、高温熱処理時に B 原子が著しく拡散すること、注入飛程端ではアクセプタ密度とほぼ同量の点欠陥が形成され、キャリア補償を引き起こしていることを明らかにしている。SiC 中の B 原子に関する様々な問題点を解明、整理し、SiC デバイス応用には Al が適切なアクセプタであることを示している。また、注入不純物の横方向および縦方向広がり走査型広がり抵抗測定、二次イオン質量分析により評価し、 $\langle 0001 \rangle$ 軸に垂直方向の拡散の方が、 $\langle 0001 \rangle$ 軸に平行方向の拡散より数倍速いことを初めて見出している。

第 6 章では、超接合デバイスの基本構造となる多重 pn 接合の作製方法を検討し、将来の微細加工による高性能化を見据えたときには、エピタキシャル成長とイオン注入の繰り返しではなく、トレンチ溝を形成して埋め込み成長を行う方法が有望であることを述べている。エピタキシャル成長時の原料供給比が埋め込み成長の形態を支配することを見出し、幅 $2\mu\text{m}$ 、深さ $4\mu\text{m}$ の微細なトレンチ溝の完全埋め込み成長を達成している。また、埋め込み成長により作製した pn 接合の特性を評価し、成長前処理による欠陥低減やトレンチ側壁となる結晶面の適切な選択により、接合界面のキャリア生成・再結合に起因する漏れ電流を低減できることを見出している。これは、SiC 超接合デバイスの基本構造を初めて作製したものである。

第 7 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約した後、今後の課題と展望について議論している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、広禁制帯幅半導体 SiC(シリコンカーバイド)を用いた高耐圧・低損失の超接合パワーデバイスの実現を目指して、イオン注入による伝導性制御と埋め込みエピタキシャル成長による超接合構造の作製に関する研究をまとめたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

1. 超接合パワーデバイスのコンタクト領域となる高濃度 n 型および p 型層をリンおよびアルミのイオン注入により形成する研究に取り組み、高温イオン注入や高温熱処理によってイオン注入損傷を低減し、高い電気的活性化率を得た。独自の表面被覆層を採用することによって、良好な表面平坦性を維持しながら従来より約 2 倍優れる抵抗率を実現した。また、高濃度ドーパ層の電気的性質を低温から高温の広い温度範囲で評価し、伝導機構や理論予測との差異について重要な知見を得た。また、新しい結晶面である SiC(11 $\bar{2}$ 0) 面では室温イオン注入により非晶質層が形成されても、熱処理時に良好な再結晶化が進行し、低抵抗化が容易であることを明らかにした。
2. 超接合デバイスの耐圧維持に必要な pn 接合の形成を目指して、n 型 SiC 領域にアルミあるいはホウ素のイオン注入を行い、耐圧 1~3kV の SiC pn 接合ダイオードを実現した。pn 接合の電流-電圧特性の温度依存性から電流伝導機構、絶縁破壊機構を調べ、イオン注入分布が pn 接合特性に与える影響について重要な知見を得た。特に、自作の高品質結晶と高温熱処理技術の採用によって、温度上昇と共に耐圧が増大するアバランシェ破壊特性を得るという特筆すべき性能を実現した。
3. 超接合デバイスにおける pn 接合の基礎研究に取り組み、アルミおよびホウ素のイオン注入層における注入不純物分布とアクセプタ密度分布を精密に評価した。高温熱処理によってアルミイオン注入ではほぼ完全な活性化を達成できるが、ホウ素イオン注入では、注入不純物の拡散や点欠陥形成によるキャリア補償が顕著であることを明らかにし、SiC デバイス応用にはアルミが適切なアクセプタであることを示した。また、注入不純物の横方向および縦方向広がり走査型広がり抵抗測定、二次イオン質量分析により評価し、 $\langle 0001 \rangle$ 軸に垂直方向の拡散の方が、 $\langle 0001 \rangle$ 軸に平行方向の拡散より数倍速いことを初めて見出した。
4. 超接合デバイスの基本構造となる多重 pn 接合の作製方法を検討し、トレンチ溝を形成して埋め込み成長を行う方法が有望であることを示した。エピタキシャル成長時の原料供給比が埋め込み成長の形態を支配することを見出し、微細

なトレンチ溝の完全埋め込み成長を達成した。また、埋め込み成長により作製した pn 接合の特性を評価し、成長条件やトレンチ溝の結晶方位の影響について重要な知見を得た。

以上要するに、本論文は、イオン注入による SiC 層の低抵抗化を達成し、イオン注入により作製された pn 接合の基礎物性を明らかにし、かつ埋め込み成長により超接合デバイスの基本構造を初めて作製したもので、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成17年2月17日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。