

氏 名	だんの 野 克 典
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2757 号
学位授与の日付	平 成 19 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 工 学 専 攻
学位論文題目	Epitaxial Growth of 4H-SiC and Characterization of Deep Levels for Bipolar Power Devices (バイポーラ型パワーデバイス実現に向けた 4H-SiC のエピタキシャル成長と深い準位の評価)
論文調査委員	(主 査) 教 授 木 本 恒 暢 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) の高耐圧バイポーラ型パワーデバイス実現を目指した高純度 SiC 厚膜のエピタキシャル成長と深い準位の評価に関する研究をまとめたもので、6 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の応用分野で特に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、ユニポーラデバイスに対するバイポーラデバイスの優位性について議論している。高耐圧バイポーラ型パワーデバイスの特徴とその実現に必要な材料物性、および解決すべき問題を整理し、当該分野における本研究の位置付けを明らかにしている。特に、高耐圧を実現するための高純度 SiC 厚膜の高速成長、SiC 結晶中の深い準位の性質解明と制御、キャリア寿命制御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、化学気相堆積 (CVD) 法による SiC のエピタキシャル成長と成長層の物性評価について述べている。成長前の高温水素ガスエッチングにより SiC 基板表面に残存する研磨歪層を除去し、かつ減圧成長を行い気相中の重合反応を抑制することによって、従来の約 5 倍となる $24\mu\text{m/h}$ の高速で表面平坦性と結晶性に優れた成長層を形成することに成功している。また、成長条件や基板面方位が成長層の表面モフォロジー、純度、欠陥発生に与える影響を論じ、炭素過剰の条件で成長することによって、高純度・高品質成長層が得られることを見出している。また、基板面方位の影響を調べ、SiC を用いた高耐圧バイポーラデバイス実現には、高純度で欠陥密度の低い厚膜成長層を容易に形成することができる SiC (0001) (Si 極性面) が最適であることを見出している。

第 3 章では、窒素添加 n 型 SiC 成長層に形成したショットキー障壁の過渡容量測定を行うことによって、禁制帯の上半分に存在する深い準位を検出し、その熱的安定性や電荷状態を明らかにしている。Si の約 3 倍の禁制帯幅を有する 4H-SiC では深い準位の検出が困難となるが、700K までの高温で過渡容量測定を行うことによって禁制帯中央付近の準位の検出に成功している。次に、最も支配的で熱的にも安定な二種類の深い準位について、低エネルギー電子線照射による生成、熱処理によるアニール特性、成長条件依存性を詳細に調べている。様々な条件で成長、電子線照射、熱処理した試料において、これら主要な二種類の深い準位の密度が一対一の関係にあることを見出し、両者が電荷状態の異なる同一起源である可能性が高いことを見出している。また、SiC 中の炭素 (C) 原子のみを選択的に変位 (炭素の空格子または炭素の格子間原子が導入) させる条件で電子線を照射した試料を詳細に調べることによって、上述の主要な深い準位が炭素空格子を含む真性欠陥であることを示唆している。熱力学的な観点から、平衡状態における真性点欠陥密度が高温ほど高くなることに着目し、SiC 成長層中の深い準位密度は成長温度の上昇に伴い増大することを見出している。また、深い準位密度は成長時のガス混合比 (C/Si 比) にも依存し、成長速度依存性は非常に小さいことを明らかにしている。以上の結果を集約して、従来に比べて深い準位の密度が一桁低い高品質 SiC 結晶の作製に成功している。

第 4 章では、アルミ添加 p 型 SiC 成長層に形成したショットキー障壁の過渡容量解析を 700K までの高温で行うことに

よって、従来、未知であった禁制帯の下半分に存在する複数の深い準位を検出している。さらに、これらの準位の熱的安定性や電荷状態を調べ、1300～1600℃の熱処理によりほぼ消滅すること、正孔を捕獲して正に帯電するドナー型トラップが多いことを明らかにしている。また、C原子の変位のみを誘起する条件、およびSi原子、C原子両方の変位を誘起する条件で低エネルギー電子線照射実験を行い、約400℃の熱処理で消滅する不安定な欠陥、1300℃の熱処理を行っても消滅しない安定な欠陥を数種類ずつ見出している。本論文の第3章と合わせることによって、SiCにおいて禁制帯内全域の深い準位を検出したことは学術的に意義深い結果である。また、pnダイオードの過渡容量解析も調べ、多数キャリアトラップと少数キャリアトラップに関する有用な知見を得ている。

第5章では、SiC成長層における少数キャリア寿命をマイクロ波検出・光伝導度減衰法により評価し、その制限因子について議論している。自作の高品質SiC厚膜結晶を用いることで、従来の約3倍に相当する $2\mu\text{s}$ という長いキャリア寿命を実現している。次に、深い準位の密度、転位密度、膜厚、表面処理法等が少数キャリア寿命に及ぼす影響を明らかにし、n型成長層の過渡容量測定で見られた特定の深い準位がキャリア寿命制限因子になっていることを明らかにしている。また、この深い準位密度が低い場合は、少数キャリア寿命が膜厚の増大と共に増加する傾向にあることから、表面および界面再結合が支配的となることを示唆している。さらに、低エネルギー電子線照射によってキャリア寿命制限因子となっている点欠陥を選択的に導入することによって、キャリア寿命制御を試みている。キャリア寿命は導入した点欠陥密度（電子線照射量に対応）に応じてほぼ線形に変化し、かつ照射領域では極めて均一なキャリア寿命分布を得ており、当該分野において初めてキャリア寿命制御に成功している。

第6章は結論であり、本研究を通じて得られた高速成長による高品質SiC結晶の作製、深い準位の基礎物性、および少数キャリア寿命に関する成果について要約した後、今後の研究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）の高耐圧バイポーラ型パワーデバイス実現を目指した高純度SiC厚膜のエピタキシャル成長と深い準位の評価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. 化学気相堆積（CVD）法によるSiCの高速エピタキシャル成長に取り組み、SiC基板表面に存在する研磨歪層を成長前の高温水素ガスエッチングにより除去した後に、気相での重合反応が抑制される減圧成長を行うことによって、従来の約5倍となる $24\mu\text{m/h}$ の高速で表面平坦性と結晶性に優れたSiC成長層を形成することに成功した。また、成長条件や基板面方位が成長層の表面モフォロジー、純度、欠陥発生に与える影響を明らかにし、SiCを用いた高耐圧バイポーラデバイス実現には、高純度で欠陥密度の低い成長層が得られるSiC（0001）（Si極性面）が適していることを見出した。
2. n型およびp型SiC成長層に形成したショットキー障壁の過渡容量測定を行うことによって、点欠陥に起因する深い準位を検出し、その熱的安定性や電荷状態を明らかにした。特に、Siの約3倍の禁制帯幅を有するSiCでは深い準位の検出が困難となるが、独自の評価装置を用いて700Kまでの高温で過渡容量測定を行うことによって、SiCの禁制帯全域の深い準位を初めて検出したことは学術的に意義深い結果である。さらに、SiC中の炭素原子変位を選択的に誘起する低エネルギー電子線照射を行った試料における深い準位の生成、アニール特性、および成長条件との相関を詳細に調べ、検出された深い準位の起源に関する有益な知見を得た。特に、SiCにおいて最も支配的で熱的にも安定な二種類の深い準位について、両者の起源が共に炭素空格子を含む真性点欠陥であり、その密度が成長温度やアニール温度で支配されることを見出したことは特筆すべき成果である。
3. SiC成長層における少数キャリア寿命をマイクロ波検出・光伝導度減衰法により評価し、自作の高品質SiC厚膜結晶で従来の約3倍に相当する $2\mu\text{s}$ という長いキャリア寿命を実現した。次に、様々な深い準位の密度、膜厚、表面処理法等が少数キャリア寿命に及ぼす影響を明らかにし、n型成長層の過渡容量測定で見られた特定の深い準位がキャリア寿命制限因子になっていること、およびこの深い準位密度が低い場合は、表面、界面再結合が支配的となることを明らかにした。さらに、低エネルギー電子線照射によってキャリア寿命制限因子となっている点欠陥を選択的に導入する

ことにより、初めて SiC のキャリア寿命制御に成功した。

以上、要するに、本論文は、高品質 SiC の高速エピタキシャル成長を実現し、結晶中の点欠陥に由来する深い準位の基本的性質を解明し、キャリア寿命制御に成功したもので、学術上、實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19年1月22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。