

氏 名	木 本 恒 暢
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	論 工 博 第 3086 号
学位授与の日付	平 成 8 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	Step-Controlled Epitaxial Growth of α -SiC and Device Applications (α -SiCのステップ制御エピタキシャル成長とデバイス応用)
論文調査委員	(主 査) 教 授 松 波 弘 之 教 授 佐 々 木 昭 夫 教 授 藤 田 茂 夫

論 文 内 容 の 要 旨

科学技術の進展に伴って半導体デバイスに対する要求は厳しくなり、既存の半導体ではその物性の限界のために、要求に応えられない分野が生じており、それに応える新しい半導体の開発が強く望まれている。本研究は、ワイドギャップ半導体シリコンカーバイド(SiC)のエピタキシャル成長における結晶構造(ポリタイプ)の制御、高純度・高品質成長層の作製と物性制御、およびデバイス応用に関する研究をまとめたもので、8章から成る。

第1章は序論であり、SiCのポリタイプ現象と物性、デバイス応用面でのSiCの優位性を述べ、研究の現状と課題を示した後、本研究の目的を述べている。

第2章では、 SiH_4 と C_3H_8 を原料ガスとする化学気相堆積法におけるステップ制御エピタキシー(オフ基板上の成長)について述べている。 α -SiC {0001} ジャスト基板上に α -SiCを成長させるには、 1800°C 程度の高温が必要であり、これより低温では、低温安定型の3C-SiCが成長する。{0001}に微傾斜(オフ)をつけて研磨して基板表面に多くの原子ステップを形成し、ステップフロー成長を活用して 1500°C での成長を可能としている。条件の最適化によって、 1200°C での成長も成功させ、SiC結晶成長におけるポリタイプの決定要因を考察している。

第3章では、SiCのステップ制御エピタキシーの機構を解明している。ガス流量比、基板のオフ角度、面極性、温度が成長速度やポリタイプに及ぼす影響を詳細に調べ、SiCの成長はSi種に支配されることを見出し、成長速度が基板面極性に依存せず、その活性化エネルギーが小さい(2.8 kcal/mole)ことを、境界層モデルを用いて説明し、成長が拡散律速に依ることを明らかにしている。さらに、原子間力顕微鏡と断面透過電子顕微鏡により成長表面を観察して、基板面極性やポリタイプ特有のステップバンチングが生じることを見出し、これを表面エネルギー最小化の観点から考察している。

第4章では、表面拡散理論を基に成長を定量的に記述するモデルを考案している。平坦なテラス上の吸着種密度分布を導き、その最大過飽和比と臨界過飽和比の大小関係が成長モードを決めることを示し、次いで、成長系の平衡蒸気圧、臨界過飽和比の温度特性を計算している。成長層のポリタイプの種類を判定

して、ステップフロー成長から二次元核発生による成長に移行する成長モードの臨界を実験的に求め、モデルと組み合わせて、成長条件（基板温度、成長速度、基板オフ角度）から、成長モードを予測する方法を確立している。

第5章では、成長初期の実験結果から、6H-SiC {0001} 基板上の核発生とステップダイナミクスを解析している。核発生密度はSi面よりC面上の方が約1桁高く、ステップの横方向成長速度は膜厚方向の成長速度より約3桁大きく、ステップの進行速度に異方性があることを見出ししている。また、顕微ラマン散乱測定から、テラス上に形成された核は3C-SiC、ステップからの成長部は6H-SiCであることを明らかにしている。さらに、表面拡散モデルを基に、ステップの横方向成長速度から吸着種の表面拡散距離を見積る方法を考案し、基板温度1500°Cで約13 μm であると推定している。

第6章では、成長層の結晶構造と物性評価、および、ドナー、アクセプタ添加による導電性制御について述べている。不純物添加のない成長層のキャリア密度を $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ (n型)まで低減し、431 cm^2/Vs という6H-SiCでは最高の電子移動度を持つ高品質の単結晶を得ている。不純物のN, Al, Bを $10^{16} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の広範囲で添加している。さらに、 N^+ , Al^+ , B^+ イオンの注入を行い、活性化には1500°C以上の高温アニールが必要であること、注入により完全なアモルファス層になると、その回復が困難であることを示している。シート抵抗として、 N^+ 注入試料で770 Ωcm^2 (n型), Al^+ 注入試料で22 $\text{k}\Omega\text{cm}^2$ (p型)を得ている。

第7章では、SiCパワーデバイスの特性解析と、基本構造のダイオードの試作結果を示している。Au/6H-SiCショットキー障壁では、1.1 kVの最高耐圧を得、オン抵抗は8.5 $\text{m}\Omega\text{cm}^2$ で、同耐圧のSiデバイスの理論限界値の約1/20まで低減している。エピタキシャル成長によるメサ形pn接合で1.7 kVの高耐圧を得、 N^+ 注入によるpn接合では450 Vの耐圧と350°Cの高温での良好な動作を実現している。

第8章は結論であり、本研究の成果の要約と将来の課題を記述している。

論文審査の結果の要旨

科学技術の進展に伴って、既存の半導体Siではその物性の限界のために対応できない分野が増え、それに応える新しい半導体材料の開発が強く望まれている。本論文は、ワイドギャップ半導体SiCの、高品質単結晶の低温作製法の確立と物性の制御、ならびにパワーエレクトロニクスデバイスの可能性を検討した研究結果をまとめたもので、得られた主な成果は次の通りである。

1. SiH_4 と C_3H_8 を原料とする化学気相堆積法を用い、SiC基板の低指数面に微傾斜をつけて、従来より300°C以上低い1500°Cで高品質の単結晶成長を可能にする、ステップ制御エピタキシー法を確立した。成長条件が成長速度や成長層に及ぼす影響を詳細に調べ、ステップ制御エピタキシーの機構を明らかにした。

2. 表面拡散理論を基に、平坦なテラス上の吸着種の最大過飽和比と臨界過飽和比の大小関係が成長モードを決めることを示し、系の平衡蒸気圧、臨界過飽和比の温度特性を計算、ステップ制御エピタキシーを実現する条件を決定した。

3. 成長層の物性を光学的・電気的手法で評価し、高品質単結晶であることを示した。成長時にN,

Al, B 不純物を添加し, $10^{16}\sim 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ の広い範囲での制御に成功した。さらに, N^+ , Al^+ , B^+ イオン注入による不純物添加法を確立した。

4. ショットキー構造や pn 接合を試作, 1 kV 以上の絶縁耐圧を得, 動作時の抵抗値を $8.5\text{ m}\Omega\text{cm}^2$ と, 同耐圧の Si パワーデバイスの理論限界の約 1/20 に低減した。また, N^+ 注入による pn 接合で 450 V の耐圧, 350°C での高温動作を実現した。

以上要するに, 本論文は, ワイドギャップ半導体 SiC 単結晶作製法であるステップ制御エピタキシーの本質の見極め, これを活用した高品質の結晶の作製, 次世代パワーデバイスの提言を含むもので, 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 8 年 1 月 8 日, 論文内容とそれに関連した試問を行った結果, 合格と認めた。