

氏 名	なか むら だい すけ 中 村 大 輔
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2926 号
学位授与の日付	平 成 20 年 3 月 24 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	Bulk Growth and Extended-Defect Analysis of High-Quality SiC Single Crystals (高品質バルク SiC 単結晶成長と構造欠陥の解析)
論文調査委員	(主 査) 教 授 木 本 恒 暢 教 授 鈴 木 実 教 授 川 上 養 一

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、次世代パワーデバイス用半導体として有望な SiC（シリコンカーバイド）単結晶中のマクロ欠陥および転位欠陥を低減する新たな結晶成長方法の提案と、その方法により得られた高品質 SiC 単結晶中の構造欠陥の解析に関する研究をまとめたもので、6 章からなる。

第 1 章では、SiC 半導体の特徴と研究の現状を紹介した後、SiC バルク結晶中に存在する構造欠陥とそれらの欠陥がデバイス特性に及ぼす影響を整理し、高品質結晶成長の重要性を述べている。次に、SiC バルク単結晶成長における転位欠陥の貫通現象について論じ、当該分野における本研究の位置づけを明らかにしている。

第 2 章では、本研究で用いた SiC バルク単結晶の成長手法である昇華成長法、および構造欠陥の評価手法である X 線トポグラフィの原理、その他の評価方法について述べている。特に、昇華成長法における問題点を整理し、成長した SiC 結晶にマクロ欠陥や転位が高密度で存在する原因について言及している。

第 3 章では、高温熱処理による SiC 単結晶中のマイクロパイプ欠陥の分解・修復について述べている。マイクロパイプ欠陥とは、大きなバーガースベクトルを持つ超らせん転位が、中空となることで転位芯の大きな弾性エネルギーを緩和したマクロ欠陥であり、SiC パワーデバイスの動作に対して著しい悪影響を与えることからその低減が強く求められている。本論文ではマイクロパイプ欠陥を含む SiC 単結晶表面に SiC 薄膜を堆積してマイクロパイプ欠陥の開口部を閉塞し、高温（約 2200℃）での熱処理によって、マイクロパイプ欠陥を分解・修復させる方法を提案し、初期に存在するマイクロパイプ欠陥の 67% 以上を修復できることを示している。さらに系統的な実験を通じて、このマイクロパイプ欠陥の分解・修復が欠陥のサイズや SiC 結晶多形に依存することを明らかにしている。次に、マイクロパイプ欠陥の修復部と未修復部との界面領域の透過電子顕微鏡（TEM）解析を実施し、欠陥修復部には、分解された 1c らせん転位のクラスターに加えて高密度の部分転位ループが存在するという特徴的な欠陥構造を見出した。この解析結果を基に、らせん転位と転位ループからなる欠陥構造のモデルを提案し、このモデルにおける弾性エネルギーを計算した結果、らせん転位クラスターを応力集中源として単独の転位ループが生成するための活性化エネルギーがマイクロパイプ欠陥のサイズや SiC 結晶多形に依存することが分かり、実験結果から得られたマイクロパイプ欠陥修復の難易と一致することを示している。さらに、転位ループ密度、転位ループ半径、および 1c らせん転位の数をパラメータとして修復構造全体（らせん転位クラスター＋複数の転位ループ）での最安定構造を求め、そのエネルギーが単純らせん転位クラスター（転位ループなし）およびマイクロパイプ欠陥（中空構造）よりも低いことを明らかにしている。

第 4 章では、マイクロパイプ欠陥の修復だけでなく、より抜本的（マイクロパイプ欠陥のみならず転位欠陥も低減可能）な解決を目指して、結晶成長の基本に立ち返り、良質の種結晶と良好な成長環境の二つを実現することにより SiC 単結晶の転位密度を大幅に低減することを試みている。通常行われる c 軸（〈0001〉軸）方向の成長（c 面成長）ではなく、a 軸方向（〈0001〉軸に垂直）への成長（a 面成長）に注目し、a 面成長結晶中の転位構造の特異性を明らかにした。この特異的な転

位構造を利用して、より良い種結晶を得るための指針を考案し、「繰り返しa面成長法 (Repeated A-Face growth method: RAF 成長法)」を提示した。本方法による良質の種結晶の作製のみならず、良好な成長環境 (熱応力の低減やパーティクル混入の防止) の実現により、マイクロパイプ欠陥が皆無であるばかりか、転位欠陥が従来に比べて大幅に少なく (転位密度で従来比1/100~1/1000)、小傾角粒界や結晶格子の歪みがほとんど無いSiC単結晶の成長を実現した。特に、良質のc面種結晶上にSiCバルク成長を行うとき、種結晶に数度のオフ角を設けることにより、積層欠陥の低減と完全な結晶多形制御が可能であることを見出した成果は特筆できる。また、低転位密度結晶の大型化 (口径2~3インチ) も試み、X線トポグラフィによって結晶品質が非常に高く、かつ均一な大型結晶が得られたことを確認している。さらに、本方法により成長した高品質SiC基板上にPiNダイオードを作製し、順方向通電劣化試験を行い、従来品質基板上でのPiNダイオードで観測される順方向電圧の上昇が発生せず、デバイスの長期信頼性が大幅に改善されることを明らかにしている。

第5章では、提案した成長法により作製された高品質SiC単結晶を放射光X線トポグラフィによって転位構造を調べ、転位の発達過程および性質について論じている。高品質SiC基板中の転位ネットワークは主に、基底面内らせん転位、貫通混合転位、および、短い貫通刃状転位から構成されていることが分かった。さらにこれら転位の接続関係も明らかにし、SiC結晶内の特徴的な転位ネットワークを初めて提示している。また、基底面内らせん転位の起源はフランクリード源ではなく種結晶からの転位継承であることを示唆する結果を得ている。さらに、混合貫通転位の放射光白色セクショントポグラフィによるc軸方向のバーガスベクトルの符号と大きさの決定を試み、混合貫通転位のc軸方向のバーガスベクトルの符号の右手巻きと左手巻きの存在比率は同程度であること、異符号転位同士は同符号転位同士に比べて短い距離分布 (200 μm 以下) を持つことを明らかにしている。また、放射光白色プロジェクショントポグラフィにおける混合貫通転位像の幅と光線追跡法シミュレーションから得られた転位像の幅との比較から、放射光白色プロジェクショントポグラフィによって転位のバーガスベクトルの符号と大きさを決定できることを示している。

第6章は結論であり、本研究を通じて得られた高温熱処理によるマイクロパイプ欠陥の分解・修復、SiC特有の転位伝播現象を活用した独自の高品質SiCバルク結晶成長方法、および得られた高品質SiC単結晶中の転位構造の解析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、次世代パワーデバイス用半導体として有望なSiC (シリコンカーバイド) 単結晶中のマクロ欠陥および転位欠陥を低減する新たなバルク結晶成長方法の提案と、それによって得られたSiC単結晶中の構造欠陥の解析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. バルク単結晶成長に用いるSiC種結晶表面に、化学気相堆積法によりSiC薄膜を形成して開口部を閉塞し、続いて約2200℃の高温熱処理を施すことにより、中空のマイクロパイプ欠陥が複数の中実らせん転位に分解して修復することを見出した。さらに、断面透過電子顕微鏡観察により、マイクロパイプ修復部には、複数のらせん転位に加えて高密度の部分転位ループが存在することが分かった。次に、この転位構造の弾性エネルギーの計算を行うことにより、観察された欠陥構造がマイクロパイプよりエネルギー的に安定であることを明らかにした。また、この熱処理によるマイクロパイプの分解・修復過程がSiC結晶多形に依存することも示した。
2. 従来、SiCバルク単結晶成長は{0001}面 (c面) 上に行われてきたが、SiC単結晶中の転位の伝播に関する特異的な性質に着目し、SiC (11 $\bar{2}$ 0) および (1 $\bar{1}$ 00) 面上へのバルク結晶成長を繰り返すことにより、貫通転位密度を大幅に低減できることを提案した。実際にこの結晶成長を実行し、成長プロセスの改良も加えることによって、転位密度が従来より3桁低い75cm⁻²という高品質SiC単結晶を得ることに成功した。さらに、この高品質SiC結晶を用いて作製したSiC PiNダイオードでは、従来問題となっていた順方向通電劣化現象が抑制され、デバイスの長期信頼性が著しく改善されることを示した。
3. 上述の方法により作製した高品質SiC単結晶中の欠陥構造を放射光X線トポグラフィにより解析し、SiC結晶中の転位構造に関する多くの重要な知見を得ている。まず透過法により結晶中に存在するSiCの転位ネットワークを初めて明らかにした。特に、基底面転位の大半が<11 $\bar{2}$ 0>方向に伸びるらせん転位であることを明らかにした成果は特筆される。次に

放射光白色セクショントポグラフィにより、SiC 結晶内を c 軸方向に貫通するらせん転位のバーガスベクトルの符号と大きさを決定した。右手巻きのらせん転位と左手巻きのらせん転位がほぼ同数存在すること、およびそれぞれのらせん転位間の距離を解析した結果を基に、SiC 結晶成長における転位発生機構と転位間の相互作用について論じている。

以上、要するに、本論文は、マイクロパイプ欠陥および転位欠陥を大幅に低減する新しい SiC バルク結晶成長法を提案し、得られた高品質 SiC 単結晶を用いて転位構造や転位間の相互作用を初めて明らかにしたもので、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20年2月20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。