

Title	4H-SiCデバイスにおける積層欠陥の発展挙動の予測と信頼性設計への活用
Author(s)	加納, 明
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/96061
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (加 納 明)		
	(職)	氏 名
論文審査担当者	主 査	教 授 澁谷 陽二
	副 査	教 授 中谷 彰宏
	副 査	教 授 渡部 平司

論文審査の結果の要旨

本論文は、著しいワイドバンドギャップの特性を持つ半導体材料 SiC を用いたデバイス設計指針に関わる内容を取り扱っている。SiC は 200 種類以上の結晶多形が確認されており、その中でも 4H-SiC はパワー半導体向けに最適とされている。従来の Si に比べて、4H-SiC は絶縁破壊電界強度、飽和電子速度、熱伝導度などに優れている。そのため、高耐圧、高速スイッチングや低オン抵抗特性の実現が可能であり、電力損失の大幅低減、機器の小型化に貢献できる次世代の低損失デバイスとして期待されている。しかしながら、PiN ダイオードなどの 4H-SiC バイポーラデバイスでは、順方向電流動作時にシングルショックレー型積層欠陥が拡張する現象が知られている。この積層欠陥の拡張と、それに伴う電気抵抗の増大はバイポーラ劣化や順方向劣化と呼ばれ、4H-SiC パワー半導体の長期信頼性を阻む大きな課題となっている。積層欠陥の拡張メカニズムは、積層欠陥によって誘起された量子井戸に電子が入り込む量子井戸作用モデルにより解釈されている。一方、積層欠陥の生成と成長は、温度や電流密度以外に基底面転位のすべり系に作用する分解せん断応力にも影響され、その予測には複合的な環境因子での検討が不可欠である。本論文は、それらの因子を取り込んだ工学的な積層欠陥の拡張挙動の予測手法の確立と、その手法を活用した実用デバイス設計への応用の可能性を示したものである。

4H-SiC パワーデバイスの信頼性設計に必要となる電流・熱・応力の作用条件下でのバイポーラ劣化現象における積層欠陥の時間発展挙動を定量的に明らかにするため、電流密度や温度に依存するキャリア密度に応じた自由エネルギーを記述し、時間依存ギンツブルグ・ランダウ (GL) 方程式に基づくフェーズフィールド (PF) 法を構築して、複合的な環境因子のもとでの積層欠陥の拡張挙動を調査している。そして、その知見を活用することで、電場・熱伝導場・応力場を連成させたマルチフィジックス有限要素法 (FEM) 解析と組合せ、実使用条件下で積層欠陥の拡張挙動を予測する信頼性設計手法を構築している。主な成果は以下の通りである。

(1) SiC バイポーラダイオードを対象に、デバイスシミュレータを用いた化学ポテンシャル、積層欠陥に関わるエネルギー密度、弾性ひずみエネルギー密度、そして外部仕事から構成される系全体の自由エネルギーが時間とともに減少する時間依存 GL 方程式に基づく PF 法を提案し、実験的に得られた積層欠陥の拡張挙動を再現している。従来より得られている実験結果を参照して実用的な解析パラメータを同定し、それらを用いることで積層欠陥の初期拡張を生じさせる電流密度の閾値が、分解せん断応力の上昇、温度の低下に伴って増加することを明らかにしている。

(2) SiC パワーモジュールの設計パラメータ (構造、使用条件) を設定し、マルチフィジックス FEM 解析により、ダイオードの電流密度分布、温度分布、応力分布を取得している。(1) の成果より得られた応力印加下での劣化現象の解析により積層欠陥の初期拡張面積を予測し、それらをデータベース化することで応答曲面モデルを求める信頼性解析法を構築している。その応答曲面を用いた評価結果は従来の実験結果を定量的に再現しており、実用的なデバイス設計への活用が可能であることを示している。

(3) (2) で得られた応答曲面モデルを用いて、設計パラメータ、電流密度、温度、応力の状態から積層欠陥の拡張を予測し、設計基準に供される設計パラメータの改善を行っている。このことから、本手法は積層欠陥の拡張可能性のある全領域でその挙動を効率的に予測することができるため、実際に使用される条件下での SiC パワーモジュール全体の設計改善・最適化に応用できることを示している。

(4) デモ用の SiC パワーモジュールを解析対象にした熱変形結果と、負荷応力による帯状積層欠陥の拡張閾値となる電流密度の予測結果は実験結果と極めて良好な一致を示し、提案手法が信頼性のある予測技術となることを明らかにしている。さらに、SiC パワーモジュールを実環境で使用する条件下で動作させることを想定し、英国地下鉄車両の運用例を用いたバイポーラ劣化に対する信頼性解析を行っている。その結果、パワーモジュールの固定方法について変形を拘束しない状態に工夫することで、積層欠陥が容易に拡張する領域が約 1/39 に抑制されることを定量的に示している。これらのことから、モジュールの構造や取り付け方法などのデバイスパッケージングに関わる工学的な解の選択ができ、バイポーラ劣化を抑制するデバイス設計の改善が可能となることを明らかにしている。

以上のように、本論文で提案された手法は 4H-SiC を用いた実用的なデバイス設計手法としての活用が可能であり、今後需要が大きく見込まれる 4H-SiC のデバイス信頼性向上に貢献することになる。

よって、本論文は博士論文として価値あるものと認める。

論文内容の要旨

氏 名 (加 納 明)	
論文題名	4H-SiCデバイスにおける積層欠陥の発展挙動の予測と信頼性設計への活用
論文内容の要旨	
<p>脱炭素社会に向けて革新的な省エネルギー化（省エネ化）が求められており、飛躍的に電力効率を高められるワイドバンドギャップ半導体であるSiCの次世代パワー半導体に注目が集まっている。その中でも4H-SiCはパワー半導体向けに最適とされ、Siに比べて絶縁破壊電界強度、飽和電子速度、熱伝導率などに優れており、高耐圧、高速スイッチングや低オン抵抗特性の実現が可能である。これにより、電力損失の大幅低減、機器の小型化に貢献できる次世代の低損失デバイスとして期待されている。</p> <p>PiNダイオードなどの4H-SiCバイポーラデバイスでは、順方向電流動作時にシングルショックレー型積層欠陥が拡張する現象が知られている。この積層欠陥の拡張と、それに伴う電気抵抗の増大は、バイポーラ劣化や順方向劣化と呼ばれ、4H-SiCパワー半導体の長期信頼性の課題となっている。積層欠陥の拡張メカニズムとしては、積層欠陥によって誘起された量子井戸に電子が入り込む量子井戸作用（QWA）モデルで説明されているが、まだ十分に明らかではない。また、積層欠陥は基底面転位のすべり系に作用する分解せん断応力（RSS）にも影響を受けることが確認されており、複合的な環境因子での検討が不可欠である。</p> <p>そこで本研究では、上記課題を解決するために、4H-SiCパワーデバイスの信頼性設計に必要な電流・熱・作用応力条件下でのバイポーラ劣化現象による積層欠陥の時間発展挙動を定量的に明らかにすることを目的とした。そのために、積層欠陥の拡張を、電流密度や温度に依存するキャリア密度に応じた自由エネルギーに、せん断応力の影響も考慮し、非平衡系の非線形現象と捉える時間依存ギンツブルグ・ランダウ（GL）方程式に基づくフェーズフィールド（PF）法を構築した。その知見を活用することで、電気・熱・応力を連成するマルチフィジクス有限要素法（FEM）解析と複合し、実使用条件下で積層欠陥の拡張を予測する信頼性設計手法を構築することができた。</p> <p>本論文は、以下の5章と付録で構成される。</p> <p>第1章では、本研究の上述した背景と課題を詳述し、研究目的と本論文の構成概略を述べた。</p> <p>第2章では、SiCバイポーラダイオードにおける積層欠陥の拡張を非平衡系の非線形動力学現象と捉え、系の全自由エネルギーが時間とともに減少する時間依存GL方程式によりメソスコピックな現象として解析した。その結果、実験的に得られた積層欠陥の拡張挙動を再現し、積層欠陥の初期拡張の閾値電流密度が分解せん断応力の上昇、温度の低下に伴って増加することを明らかにした。</p> <p>第3章の信頼性解析法では、SiCパワーモジュールの設計パラメータ（構造、使用条件）を設定し、マルチフィジクスFEM解析により、ダイオードの電氣的、熱的、機械的状態を取得した。前章で得られた応力印加下での劣化現象の解析により、積層欠陥の初期拡張面積を予測し、データベース化し、応答曲面モデルを構築した。次に、応答曲面モデルにより、設計パラメータ、電流密度、温度、応力の状態から積層欠陥の拡張を予測した。その後、設計基準により設計パラメータを改善する。これにより、4H-SiCダイオードのバイポーラ劣化を招く積層欠陥の拡張を対象の全領域で効率的に予測することができるため、実際に使用される条件下でのSiCパワーモジュール全体の設計改善・最適化に応用できる手法を構築した。</p> <p>第4章では、デモモジュールの熱変形と帯状の積層欠陥の閾値電流密度の応力による変化を実験データと参考データから検証した。そして、SiCパワーモジュール全体の設計改善・最適化のために、実際にパワーモジュールを使用する条件で動作させることを想定し、SiCダイオードのバイポーラ劣化に対する信頼性解析法を適用した。設計パラメータとして、パワーモジュールの変形を拘束しないように固定方法を工夫することで積層欠陥が容易に拡張する領域が、1/39に抑制されることが示した。これらの結果は、様々な設計変数に対する積層欠陥の拡張を効率的に予測するため、設計の初期段階に本手法が有効なことを示した。また、モジュールの構造や取り付け方法などの適切なパッケージングソリューションの選択ができ、設計の改善が可能となった。</p> <p>第5章では、本研究の総括を述べた。</p>	