

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 13597 号
------	---------------

氏 名 藤 榮 文 博

論 文 題 目

放射光トポグラフィーその場観察による4H-SiC単結晶における積層欠陥拡大/縮小のダイナミクス解明
(The dynamics of stacking fault expansion/shrinkage in 4H-SiC single crystals studied by in-situ synchrotron X-ray topography)

論文審査担当者

主査	名古屋大学	教授	宇治原 徹
委員	名古屋大学	教授	宇佐美 徳隆
委員	名古屋大学	教授	山本 剛久
委員	名古屋大学	准教授	中村 篤智
委員	名古屋大学	准教授	原田 俊太
委員	電力中央研究所	領域リーダー	土田 秀一

論文審査の結果の要旨

藤榮文博君提出の論文「放射光トポグラフィーその場観察による4H-SiC単結晶における積層欠陥拡大/縮小のダイナミクス解明」は、省エネルギー技術の根幹であるパワーデバイスの次世代半導体として期待されているSiC結晶に関して、4H-SiC単結晶におけるダブルショックレー型積層欠陥の高温環境下での特異な挙動とその温度依存性、不純物（窒素、ボロン）が与える影響を、放射光トポグラフィーを駆使することで調べ、SiC結晶の高品質化への指針を得ることを目的としている。各章の概要は以下の通りである。

第1章では、SiCパワーデバイスの現状と課題を述べ、SiC単結晶内に存在する種々の結晶欠陥とデバイス特性への影響について示している。特に、半導体中の窒素不純物を高濃度に添加した4H-SiC結晶における積層欠陥の形成・拡大メカニズムについて述べ、さらにX線トポグラフィーを用いたその場観察の先行研究を紹介し、その手法の有効性について述べている。

第2章では、本研究で独自に開発した放射光トポグラフィーによる高温その場観察システムについて説明し、これを用いて、窒素添加4H-SiCにおいて1370-1550Kで拡大した積層欠陥が1550K以上では縮小することを実証した。さらに、Si面後方反射配置000、16回折によりその場観察を行ったところ、30度Siコア部分転位の移動を伴いながら積層欠陥が拡大していく様子を観察し、これにより、高温下で転位のコア構造を決定しつつ積層欠陥の挙動を追跡することが可能であることが示された。

第3章では、その場観察により積層欠陥挙動の温度・窒素濃度依存性を解明した。その結果は、積層欠陥エネルギーが窒素濃度とともに減少するが温度とともに増加、つまり拡大の駆動力が窒素濃度に対しては増加するが温度に対しては減少することを示した。また、その場観察の結果から、貫通せん転位にピンニングされた部分転位の曲率から高温における γ の値を定量的に求めた。これにより、1800K以上での熱処理が積層欠陥の拡大抑制に効果的という知見を得た。

第4章では、高窒素濃度の4H-SiC結晶において部分転位の形状変化とともに積層欠陥の拡大が停止することがあることを示した。また、他のSiC結晶における積層欠陥拡大速度との比較から、部分転位の活性化エネルギーの上昇により積層欠陥の拡大が停止したことが示唆された。さらに、断面HAADF-STEMによるEDS測定、ex-situ放射光トポグラフィー観察により、点欠陥（空孔）と部分転位との相互作用による上昇運動で転位のコア構造がSiコアからCコアへの変化したことが部分転位の不動化要因として示唆された。

第5章では4H-SiC単結晶へ窒素とともにボロンを共添加することによる積層欠陥拡大抑制の機構を解明した。転位の活性化エネルギーはボロン添加によって減少しており、ボロンによるアクセプター準位への電子捕獲を介した積層欠陥エネルギーの上昇（絶対値の減少）が拡大抑制の要因と考えられ、一方、SiC結晶中のボロン濃度が高い場合、積層欠陥の拡大速度はむしろわずかに増加し、より高温まで拡大し続ける傾向がみられた。これはSiC結晶内のボロンが一部Dセンターとなり、アクセプター不純物として機能しなかったことが一つの要因として考えられ、アクセプターとして働く不純物の濃度を増やすことが積層欠陥の拡大抑制に効果的といえる。

第6章では、放射光トポグラフィーの2次元画像からSiC結晶における基底面らせん転位の結晶表面からの深さ評価が可能であることを明らかにした。On-axis 4H-SiC単結晶の11 $\bar{2}$ 8回折像における基底面らせん転位のコントラストは上下の黒い線に縁どられた白いコントラスト、黒いコントラストの2種類に大きく分類され、4度オフSiC結晶における基底面らせん転位のコントラストとの比較から、2種類のコントラストは転位の深さの違いによるものであることが示唆された。また、X線トポグラフィーにおける基底面らせん転位の像のシミュレーションにより転位の深さ変化に伴うコントラストの変化が明らかとなった。さらに放射光トポグラフィー像における転位と垂直な方向の強度プロファイルから基底面らせん転位の深さの評価が可能であり、X線の侵入深さが異なる像における強度プロファイルを比較することで、より正確に転位深さを見積もることができると示唆された。

第7章では、本研究の結論を与えている。

以上のように本論文では、放射光トポグラフィーその場観察により、窒素添加した4H-SiC単結晶におけるダブルショックレー型積層欠陥の温度、不純物（窒素、ボロン）濃度依存性を解明し、積層欠陥エネルギー γ が正の温度域での熱処理による積層欠陥の縮小、ボロン共添加による積層欠陥拡大速度の減少、高窒素濃度SiC結晶における部分転位の不動化のメカニズムを明らかにしている。これらの結果は、高品質かつ低抵抗のn型4H-SiC単結晶を得る上で有用であり、SiCパワーデバイスのさらなるオン抵抗の低減、デバイス性能向上のために重要であり、工学の発展に寄与するところが大きいと判断できる。よって、本論文の提出者である藤榮文博君は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格があると判断した。