

(様式第 5 号)

X 線トポグラフィーによる 4H-SiC 単結晶中の結晶欠陥の評価(Ⅱ) Characterization of crystallographic defects in 4H-SiC single crystals by X-ray topography(Ⅱ)

山下 任、着本 享、林 将平、小松直佳、周防裕政、山口博隆、児島一聡、
先崎純寿、三谷武志

T. Yamashita, S. Tsukimoto, S. Hayashi, N. Komatsu, H. Suo, H. Yamaguchi,
K. Kojima, J. Senzaki, T. Mitani

産業技術総合研究所 先進パワーエレクトロニクス研究センター
Advanced Power electronics Research Center,
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

- ※ 1 先端創生利用（長期タイプ）課題は、実施課題名の末尾に期を表す（Ⅰ）、（Ⅱ）、（Ⅲ）を追記してください。
- ※ 2 利用情報の公開が必要な課題は、本利用報告書とは別に利用年度終了後 2 年以内に研究成果公開（論文（査読付）の発表又は研究センターの研究成果公報で公表）が必要です（トライアル利用を除く）。
- ※ 3 実験に参加された機関を全てご記載ください。
- ※ 4 共著者には実験参加者をご記載ください（各実験参加機関より 1 人以上）。

1. 概要（注：結論を含めて下さい）

4H-SiC エピタキシャル膜中で観察される、積層欠陥複合体（stacking fault complex: SFC、俗称キャロット）に関して、single Shockley 型積層欠陥（1SSF）形成を伴うタイプの存在が確認された。1SSF 形成を伴うタイプと伴わないタイプの判別には、X 線トポグラフィーが有用であることが明らかになった。また当該 1SSF は、基底面転位の場合と同様に、UV 光照射により拡大を起こすことも確認された。

(English)

A new type stacking fault complex (SFC:so-called carrot defect) which form a single Shockley-type stacking fault (1SSF) are found in 4H-SiC epitaxial films. It is confirmed that X-ray topography is useful for the determination of types of SFC, with and without formation of a 1SSF. It is also confirmed that the 1SSF expand under UV irradiation as with the case of basal plane dislocations.

2. 背景と目的

本年度は、内製及び市販品の4H-SiCウェーハに対して、X線トポグラフィーにより、基板ウェーハ、エピタキシャル層、あるいはデバイス構造ウェーハの欠陥を観察し、デバイスの性能や信頼性に大きく影響すると考えられる転位、積層欠陥等の結晶欠陥の解明を中心に研究を進めてきた。バルク結晶中の結晶欠陥評価[1]、及び当該基板上エピ膜中の巨視的な欠陥の起源や形態等で有用な知見が得られた他、MOSFETのボディードायオードの順方向劣化を引き起こす基底面転位に関して、バーガースベクトル、コア構造等の有用な知見も得られた[2]。このほか、欠陥評価の国際標準規格改訂版策定のためのデータの整理や、市場におけるウェーハの動向調査による情報の蓄積を前年度に続いて進めてきた。本年度得られた結果の中から、第Ⅰ期に、バルク結晶中の、転位の変換挙動について利用結果を報告した。本報告では、エピタキシャル膜中に形成された、構造未報告のタイプの欠陥の観察結果を報告する。

Single Shockley型積層欠陥形成を伴う積層欠陥複合体の構造解析

はじめに

4H-SiCエピタキシャル膜中に形成されるFrank型積層欠陥の、一端に部分転位が導入され、もう一端にprismatic欠陥 (PF) と呼ばれる縦方向の面欠陥が導入された、積層欠陥複合体 (SFC) [3]と呼ばれる欠陥が形成されることが知られている。SFCは、PFがエピタキシャル膜表面に特徴的なモフォロジーを形成することから、carrot欠陥とも称される[4]。我々が最近の市販品エピタキシャルウェーハについて、X線トポグラフィに光学顕微鏡、フォトルミネッセンス (PL) 等を併用してSFCの構造解析を進めた結果、これまでの報告例[4]とは異なる、1SSF形成を伴うタイプが存在することが確認された。

3. 実験

試料は市販品 4H-SiC エピタキシャルウェーハで、エピタキシャル膜厚は $30\mu\text{m}$ である。SFC のモフォロジー観察は、共焦点微分干渉顕微鏡 (CDI) 法により行った。SFC を構成する積層欠陥の発光波長[5]に対応する、フォトルミネッセンスの 420nm バンドパスフィルター (PL 420nm -BPF) 像観察により、ウェーハ面内での SFC 発生位置を確認した。SFC の部分転位は斜入射 X 線トポグラフィにより、4H-SiC の $\bar{1}\bar{1}28$ 、 $11\bar{2}8$ の反射で観察を行った。1SSF の拡大は、PL 装置の Hg-Xe ランプの UV 光を、フィルタリングを行わずに SFC に照射して検証した。拡大した 1SSF は、同様の 420nm -BPF 像観察により確認した[6]。

4. 実験結果と考察

図 1-(1)~1-(3)には、同一の SFC から得られた、 420nm -BPF 像、CDI 像、X 線トポグラフィを各々示す。1-(2)の CDI 像では、SFC 上端部にスジ状モフォロジーが確認されるのに対して、1-(3)のトポグラフィでは両端にコントラストが認められる。1-(3)上端部の比較的弱く白いコントラストは、1-(2)上端部のスジ状モフォロジーの位置と一致する。一方 1-(3)下端部では白黒スジ対のコントラストが確認され、これは Frank 型部分転位の形成を反映している[4]。この様な、一端にスジ状モフォロジー、もう一端に Frank 型部分転位が形成されているという特徴は、既報告の SFC の場合と一致し[4]、スジ状モフォロジー側端部に PF が形成されていることを我々は確認している。また、1-(2)のように、CDI 像で一端に見られるモフォロジーが線状で、いわゆる carrot 状とは異なる場合であっても、この事は当てはまっている。

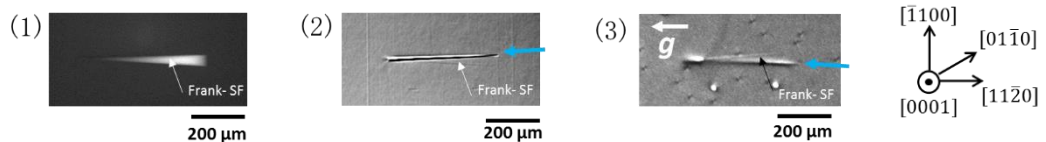


図1 (1)~(3) SFCの、 420nm BPF像、CDI像、X線トポグラフィ ($g = -1\bar{1}28$)

- (1) SFC Frank型SF領域の 420nm 発光。
- (2) SFC上端部のスジ状モフォロジー (青矢印)。
- (3) SFC下端部のFrank型部分転位コントラスト (青矢印)。

図 2-(1)~2-(4)には、別の SFC から得られた、 420nm -BPF 像、CDI 像、X 線トポグラフィを各々示す。図 1 の SFC と同様、PF が形成されている側の端部にスジ状モフォロジー、もう一方に Frank 型部分転位が形成されているが、2-(3)の X 線トポグラフィ ($g=\bar{1}\bar{1}28$) において、PF 形成側の端部に白黒スジ対のコントラストが確認される点が図 1 の SFC と異なる。さらに、2-(4)の X 線トポグラフィ ($g=11\bar{2}8$) では、PF 形成側の端部の白黒スジが、2-(3)の場合と比べて反転している様子が確認される。このようなコントラスト変化は、拡大した 1SSF の部分転位の挙動[7]に類似している。

図 2-(5)には、2-(1)~2-(4)の SFC に UV 光を約 7 時間照射した後の 420nm -BPF 像を示した。PF 形成側の端部から SFC 外側に向かって、台形のコントラストが拡大する様子が確認された。この挙動も、4H-SiC に通電した際に基底面転位を起源として 1SSF が拡大する場合と一致している[8]。

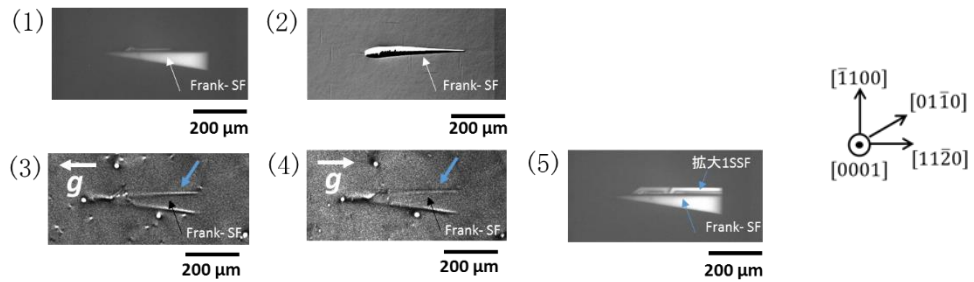


図2 (1)～(5) 1SSF形成を伴うSFCの、420nm BPF像、CDI像、X線トポグラフィ($g = -1\bar{1}28$ および $11\bar{2}8$)、UV照射後420nm BPF像。

- (1) SFC Frank型SF領域の420nm発光。
- (2) SFC上端部のスジ状モフォロジー (PF形成)。
- (3) SFC上端部 (PF形成) の白黒対コントラスト (青矢印)。
- (4) SFC上端部 (PF形成) の白黒対コントラスト (青矢印)。
※(3)とコントラスト反転。
- (5) UV照射後。SFC Frank型SF領域+拡大1SSFの420nm発光。

以上の結果から、SFC に、1SSF 形成を伴うタイプが存在することが確認される。また、1SSF 形成有り無しの判断は、斜入射 X 線トポグラフィの $g=\bar{1}\bar{1}28$ 、 $11\bar{2}8$ 条件における PF 部分のコントラスト変化から推定が可能であることがわかった。さらに、[7]に示されている事例を参照すると、図 2-(3)、2-(4)で確認されたコントラスト変化； $g=\bar{1}\bar{1}28$ で $[\bar{1}100]$ 側に白スジ、 $g=11\bar{2}8$ で $[\bar{1}100]$ 側に黒スジ、の場合では、1SSF の部分転位のバーガースベクトルが $b=1/3[01\bar{1}0]$ である可能性が示唆され、この事から拡大する 1SSF の形状、拡大方向[8]を推定することも可能である。

5. 今後の課題

1SSF 形成を伴う SFC がどのような機構で形成されるか、1SSF 形成に必要な、基底面に平行な方向の変位がどこからもたらされるかについて、微細構造解析により明らかにすることが必要である。

6. 参考文献

- [1] 江藤数馬 他, 先進パワー半導体分科会誌 第 5 回講演会予稿集, 249-250 (2018).
- [2] 林将平 他, 先進パワー半導体分科会誌 第 5 回講演会予稿集, 135 (2018).
- [3] JEITA standards, JEITA EDR-4712/100 “SiC ウェーハの結晶欠陥の非破壊検査方法(Part 1: 結晶欠陥の分類)”, 2016 年 3 月.
- [4] H. Tsuchida, et al, Phys. Status Solidi B **246**, 1553 (2009).
- [5] M. Aoki, et al, Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 061301 (2013).
- [6] I. Kamata, et al, Mater. Sci. Forum **725**, 15 (2012).
- [7] H. Matsuhata, et al, Philos. Mag. **94**, 1674-1685 (2014).
- [8] S. Hayashi, et al, Jpn. J. Appl. Phys. **57**, 04FR07(2018).

7. 論文発表・特許 (注: 本課題に関連するこれまでの代表的な成果)

8. キーワード (注: 試料及び実験方法を特定する用語を 2～3)

4H-SiC、prismatic 欠陥、斜入射 X 線トポグラフィ

9. 研究成果公開について (注: ※2 に記載した研究成果の公開について①と②のうち該当しない方を消してください。また、論文(査読付)発表と研究センターへの報告、または研究成果公報への原稿提出時期を記入してください(2018 年度実施課題は 2020 年度末が期限となります)。長期タイプ課題は、ご利用の最終期の利用報告書にご記入ください。

① 論文(査読付)発表の報告 (報告時期: 2019 年 12 月)