

# 放射光を用いたX線トポグラフィによるSiC中の欠陥評価

古庄 智明<sup>1</sup>、中村 勇<sup>1</sup>、岡田 貴<sup>2</sup>

<sup>1</sup>三菱電機株式会社先端技術総合研究所

<sup>2</sup>メルコセミコンダクタエンジニアリング株式会社

## 1. はじめに

電力エネルギーを高効率で最適に制御するパワーエレクトロニクス技術は、これまで省エネルギー、省資源に大きく貢献してきた。その中で中心的役割を果たしているのがパワーデバイスである。パワーデバイスに用いられる半導体は Si が一般的であるが、その材料物性に起因する性能限界に近づきつつあり、さらなる高性能化が一層困難になってきている。

昨今、Si に替わる新しいパワーデバイス用半導体材料として、SiC や GaN などのワイドバンドギャップ半導体が注目されている。表 1 に主な半導体材料の代表的な物性値を示す<sup>[1]</sup>。なお、SiC には 4H-SiC や 6H-SiC といった結晶多形が存在するが、パワーデバイス用途に最も適した 4H-SiC の物性値を表 1 に記載している。

表 1. 主な半導体の物性値

半導体材料	Si	SiC	GaN
バンドギャップ[eV]	1.12	3.26	3.42
絶縁破壊電界強度 [MV/cm]	0.3	2.8	3
熱伝導率[W/cmK]	1.5	4.9	1.3
バリガ性能指数	1	470	850

表 1 からわかるように SiC や GaN のワイドバンドギャップ半導体は、いずれも Si の 10 倍程度の絶縁破壊電界強度を有し、パワーデバイス用半導体材料の指標となるバリガ性能指数は Si を凌駕する。このため、これらの半導体材料を用いたパワーデバイスでは、Si パワーデバイスよりも低抵抗化・高耐圧化が可能である。また、SiC は Si の 3 倍以上に熱伝導率が大きいため、高耐圧パワーデバイスに適している。弊社では SiC パワーデバイスを鉄道やエアコンなどに適用しており、順次適用範囲を拡大中である<sup>[2]</sup>。

半導体物性値から予想できる高性能デバイスの実

現のためには、欠陥が無い理想的な結晶の使用が望まれる。しかしながら、SiC 基板には  $10^4/\text{cm}^2$  台程度の結晶欠陥が存在する。結晶欠陥種として、 $\langle 0001 \rangle$ c 軸方向の貫通転位である、貫通らせん転位(Threading Screw Dislocation : TSD)、貫通刃状転位(Threading Edge Dislocation : TED)、および、これらが混在している貫通混合転位(Threading Mixed Dislocation : TMD)が存在する<sup>[3]</sup>。また、 $(0001)$ c 面内の欠陥として基底面転位(Basal Plane Dislocation : BPD)、積層欠陥(Stacking Fault : SF)が存在する。

TSD および TMD はバーガースベクトルに  $\langle 0001 \rangle$  成分を含む転位であり、デバイス耐圧特性に影響すると報告されている<sup>[4]</sup>。一方、TED はバーガースベクトルに  $\langle 0001 \rangle$  成分を含まない転位であり、酸化膜の信頼性に影響すると報告されている<sup>[5]</sup>。また、BPD、SF は PN 接合の順方向特性の劣化を誘発するため、MOSFET に内蔵されるボディダイオード活用時には、これらの欠陥の影響を抑制しなければならない<sup>[6]</sup>。

SiC 基板の低転位化については、溶液成長法等の新しい結晶成長方法により、改善が進んでいる<sup>[7]</sup>。しかしながら、現状の市販基板は欠陥密度が高く、高性能デバイス実現のためには、不良となったデバイスの解析により、欠陥の影響の抑制技術の開発が重要となる。このため、欠陥の正確な評価技術が必要である。SiC の欠陥検出方法として、熔融 KOH エッチング法および放射光を用いた X 線トポグラフィ法が挙げられる。今回、両方法を用いて、SiC 基板に存在する欠陥を評価した。

## 2. 実験内容

試料には市販の直径 100 mm のエピタキシャル膜付き 4H-SiC  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$  4 度オフ基板を用いた。

X 線トポグラフィ測定は九州シンクロトロン光研究センターの BL09 および BL15 を用いて行った。二

つの単結晶 Si(111)モノクロメータにより白色光を単色 X 線化し、1-107 および 11-28、-2118 の回折ベクトル使用し、反射配置にて測定を行った。撮像には X 線フィルムを用いた。

熔融 KOH エッチングは温度約 500°C の熔融 KOH 中に SiC 試料を約 4 分間浸し、エッチピットを出現させた後、光学顕微鏡により試料表面を撮影し、エッチピットを評価した<sup>8)</sup>。

また、SF の評価は SiC 基板に PN ダイオードを形成し通電により BPD を SF に拡張させた後に行った。

### 3. 結果及び考察

#### 3-1 貫通転位の評価

まず、熔融 KOH エッチング法と X 線トポグラフィ法により貫通転位の評価を行った。図 1 に同一箇所 (a) 熔融 KOH エッチング後の SiC 基板の光学顕微鏡写真、(b) X 線トポグラフィ像を示す。X 線トポグラフィ撮影は 11-28 の回折ベクトルを用いた。エッチング処理により出現したエッチピットは、大ピット、小ピットおよび貝殻状ピットであった。エッチピットサイズは小エッチピットでは 20  $\mu\text{m}$  前後、大エッチピットでは 80  $\mu\text{m}$  前後であった。一方、X 線トポグラフィ像では大輝点、小輝点、線状欠陥が観察された。

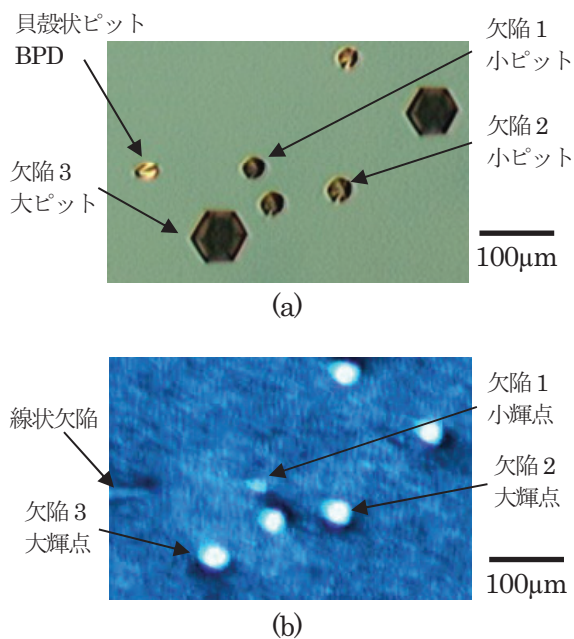


図 1. 同一箇所の(a)熔融 KOH エッチング後の光学顕微鏡写真、(b)X 線トポグラフィ像

図 1 より、欠陥 1、欠陥 2 は、ほぼ同じ大きさのエッチピットにもかかわらず、X 線トポグラフィ像では輝点サイズが異なっていることがわかる。透過型電子顕微鏡により各輝点の欠陥のバーガスベクトル解析を行った結果、欠陥 2、欠陥 3 の大輝点は  $b = \langle 0001 \rangle + 1/3 \langle 11-20 \rangle$  の TMD であり、欠陥 1 の小輝点は  $b = 1/3 \langle 11-20 \rangle$  の TED であった。複数の解析を行ったが、いずれも同じバーガスベクトルを有する欠陥であった。

また、貝殻状エッチピットは BPD 起因であることが報告されており<sup>9)</sup>、BPD エッチピットが存在する箇所の X 線トポグラフィ像では線状欠陥が存在した。

以上の結果より、X 線トポグラフィ像において欠陥に起因する輝点の大きさは、貫通転位のバーガスベクトルの大きさに比例していることが明らかになり、X 線トポグラフィにより貫通転位の正確な分類が可能であることが明らかになった。

X 線トポグラフィ像における輝点の大きさは、欠陥のバーガスベクトルの大きさに比例することが明らかになったが、TSD のバーガスベクトル  $b = \langle 0001 \rangle$  の大きさと、今回検出した TMD のバーガスベクトル  $b = \langle 0001 \rangle + 1/3 \langle 11-20 \rangle$  の大きさには顕著な差は無い。これらの分類は、本実験系と同様の実験系で実施された報告がある<sup>10)</sup>。今回の評価結果では大輝点は TMD に対応していたが、TSD も存在すると考えられ、今後、より詳細な解析を行ってゆく。

#### 3-2 積層欠陥の評価

図 2 に PN ダイオードに順方向電流を印加し、電極を剥離した後、撮像した X 線トポグラフィ像を示す。同一箇所を (a) 1-107 および (b) -2118 の回折ベクトルで観察した。1-107 回折で得られた像には SF が黒くなって観察できる (図中の SF)。また、回折ベクトル -2118 では SF の部分転位および、SF の頂点に TED が存在し、かつ BPD が繋がっていることが確認できる。

SF 頂点に BPD が繋がっていることから、PN ダイオードへの順方向電界印加により BPD が拡張したと考えられる。また、エピタキシャル成長時に基板表面に現れている BPD の大部分は、エピタキシャル成長

開始直後に TED に変換されるため、図 2 中の TED は BPD が変換した TED に相当すると考えられる<sup>[11]</sup>。

今回の実験により、BPD が TED に変換しても、SF への拡張現象が確認され、貫通転位だけでなく、積層欠陥の観察にも X 線トポグラフィが有効であることが確認できた。今回観察された現象は、PN ダイオードの電流密度が高く、正孔が基板内に到達し、基板 BPD が SF に拡張したと考えられる<sup>[12]</sup>。

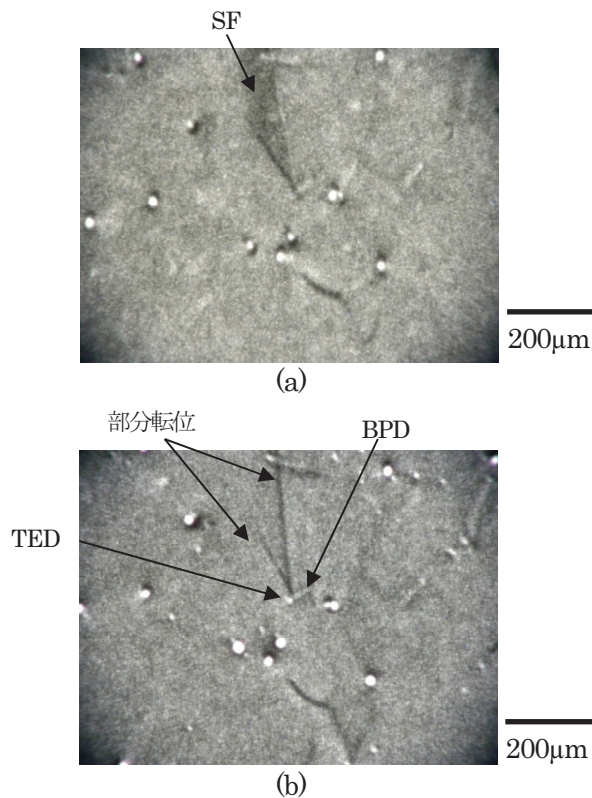


図 2. 順方向電流印加後の SiC 基板の X 線トポグラフィ像 (a)1-107 回折、(b)-2118 回折

#### 4. まとめ

高性能 SiC デバイスの実現に向け、放射光を用いた X 線トポグラフィにより、SiC 基板中の結晶欠陥評価を行った。その結果、貫通転位のバーガスベクトルの大きさと X 線トポグラフィ像の輝点の大きさが比例していることが確認できた。また、BPD および BPD が拡張した SF の観察、さらには BPD が変換した TED の観察が可能であることも確認し、BPD 拡張現象の原因解析に有効な方法であることが明らかになった。

#### 謝辞

本実験を進めるに当たって、X 線トポグラフィ測定において、様々な御指導、御助言を頂いた九州シンクロトロン光研究センター石地耕太朗博士に感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] 松波弘之、半導体 SiC 技術と応用 第 2 版 p14.
- [2] <http://www.mitsubishielectric.co.jp/semiconductors/application/sic/index.html>
- [3] Y. Sugawara et al., Applied Physics Express **5**, 081301 (2012).
- [4] R. A. Berchman et al., J. Applied Physics **107**, 114504 (2010).
- [5] T. Watanabe et al., Mater. Sci. Forum **778-780**, 517-520 (2014).
- [6] J. Takahashi et al., J. Crystal Growth **181**, 229-240 (1997).
- [7] K. Murayama et al., J. Crystal Growth **468**, 874-878 (2017).
- [8] Y. Yao et al., Jpn. J. Applied Physics **50**, 075502 (2011).
- [9] J. Takahashi et al., J. Crystal Growth **135**, 61-70 (1994).
- [10] F. Wu et al., Mater. Res. Soc. Symp. Proc. **1433** (2012).
- [11] S. Ha et al., J. Crystal Growth **244**, 257-266 (2002).
- [12] 林 将平 他、先進パワー半導体分科会誌 第 4 回講演会予稿集 21-22.