

(様式第5号)

パワーエレクトロニクス素子としてのSiCの結晶欠陥評価(II) Characterization of crystallographic defect in SiC for power electronics devices

林 将平, 山下 任, 着本 享, 小松 直佳, 山口 博隆
Shohei Hayashi, Tamotsu Yamashita, Susumu Tsukimoto,
Naoyoshi Komatsu, Hirotaka Yamaguchi

産業技術総合研究所 先進パワー半導体エレクトロニクス研究センター
Advanced Powerelectronics 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(トライアルユースを除く)。
- ※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バイポーラデバイスにおける順方向通電劣化は、基底面転位(BPD)を起源とした積層欠陥(SF)の拡張が要因である。本研究では、SFが拡張する電流密度に対して、SF形状、拡張起点BPDの種類、バーガスベクトルについてX線トポグラフィ法、フォトルミネッセンス、透過型電子顕微鏡を用いて詳細に調査した。その結果、低電流密度でSF拡張する貫通BPDに対して、貫通刃状転位(TED)に転換したBPDは高い電流密度までSF拡張しないことが分かった。また、TED転換BPDにおけるSF拡張電流密度のばらつきは、BPDのバーガスベクトルに起因しないことが明らかとなった。

A forward degradation in 4H-SiC bipolar devices is due to the stacking faults (SF) expansion originating the basal plane dislocation (BPD). In this work, we investigated SF shapes, the kind of BPDs, and the Burgers vector for current density by using a grazing incident monochromatic X-ray topography, photoluminescence, and transmission electron microscope. As a result, BPDs in epitaxial layer expanded in lower current density than that of BPDs converted into threading edge dislocation (TED). It was clarified that the origin of variation for SF expansion current density was not Burgers vector of BPDs converted into TED but other factors.

2. 背景と目的

4H-SiCバイポーラデバイスにおいて順方向通電時、時間経過に伴いオン電圧が上昇する順方向通電劣化が深刻な問題となる。この通電劣化は、エピタキシャルウェハ内のBPDを起源としたSFの拡張により引き起こされる[1, 2]。BPDは2本のショックレー部分転位として基底面上に存在しており、その間にショックレー型SFが形成される。Si-core部分転位は電子-正孔再結合により移動するため、順方向通電によりSFが大きく拡張する。このSF拡張現象は、通電時の電流密度により異なることが分かっているが、詳細に調査された報告はない。本研究では、4H-SiC PiNダイオードの順方向通電劣化における電流密度と積層欠陥拡張起点の関係を調査した。

3. 実験

[11 $\bar{2}$ 0]方向に4°オフカットしている市販n型4H-SiC基板Si面上に膜厚10 μm のエピタキシャル成長層を形成後、Alイオン注入によりp型層、電極することでPiNダイオードを作製した。電流密度25-600 A/cm^2 を段階的に印加することで通電試験を行った。通電試験後、電極を剥離した試料において

フォトルミネッセンス(PL)像によりSF形状を観察、波長0.15 nmの斜入射X線トポグラフ法により112̄8、1̄128、2̄118、12̄18の各反射において転位構造を調査した。また、これらの手法により特定されたSF拡張起点位置において透過型電子顕微鏡(TEM)観察を用いて更に詳細に起点構造を解析した。

4. 実験結果及び考察

SF拡張電流密度に対するPL (420 nm バンドパスフィルター) 像から観察されたSF形状を図4-1に示す。ショックレー型SFは通電試験により拡張し、波長420nmのPL発光を与える[3]。図4-1PL像においてエピタキシャル層/基板界面を起点とした帯及び三角形状のSFの形成が認められた。SF形状をSF拡張が認められた電流密度についてまとめると、25 A/cm²の低電流密度におけるSF拡張と300 A/cm²以上におけるSF拡張に大別された。また、帯状SFは300 A/cm²以上において形成されることが分かった。そこで各反射を用いてX線トポグラフ像を取得し、SF拡張の起源となる欠陥について調査した。その結果、SF拡張の起源となるBPDには、ウエハ内からエピタキシャル層表面まで形成されている貫通BPDとエピタキシャル成長により貫通刃状転位 (TED) に転換したBPDの2種類あることが分かった (図4-2)。この時、25 A/cm²で拡張したSFの起源は貫通BPDであり、300 A/cm²以上においてはTED転換BPDが起源であることが明らかになった。±1/3[112̄0]のバーガースペクトルを有するBPDの一部はTEDに転換せず、ステップフロー方向に平行する30° Si-core及び30° C-coreの2本のショックレー部分転位としてエピタキシャル層内に残存することが報告されている[4]。そのため25 A/cm²の低電流密度においても、通電により30° Si-core部分転位に正孔が容易に到達し、電子と再結合することでSFが拡張したと考えられる。一方、TED転換BPDはエピタキシャル層/基板界面付近でTEDに転換しているため、多量の正孔がBPDに到達する300 A/cm²まで拡張しなかったと示唆される。300 A/cm²以上において、SF拡張電流密度のばらつきが認められた。そこで起源となったBPDのバーガースペクトル (b_{BPD}) を調査した。

b_{BPD} はSF形状とX線トポグラフ像から判別することができる[2, 5]。図4-3に三角状SFのPL像及び各反射におけるX線トポグラフ像を示す。PL像に示される下三角形状の場合、考えられる b_{BPD} は±1/3[112̄0]もしくは±1/3[2̄110]である。X線トポグラフ像においてBPDが転換したTEDのコントラ

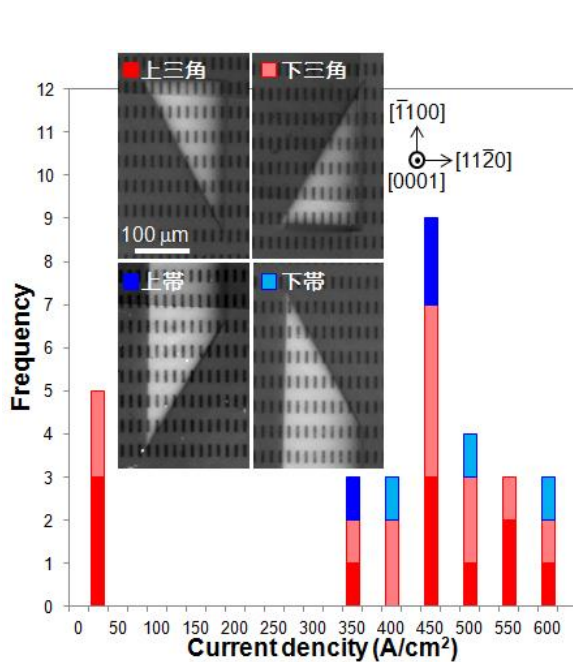


図 4-1 拡張 SF の形状と電流密度の関係

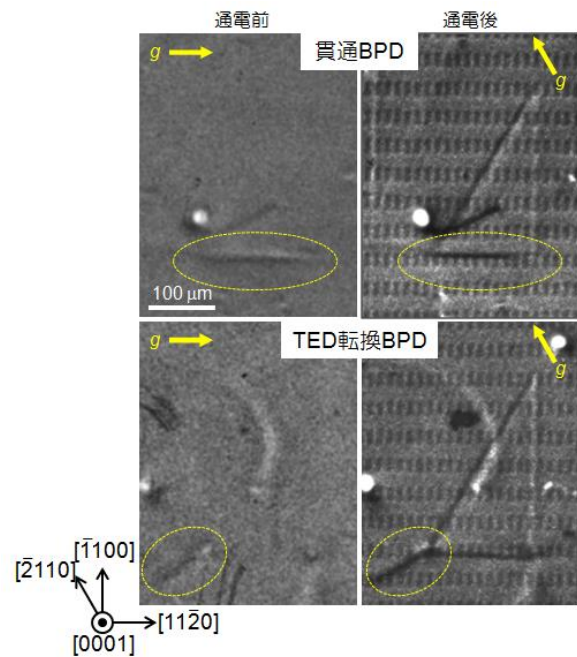


図 4-2 通電試験前後の X 線トポグラフ像

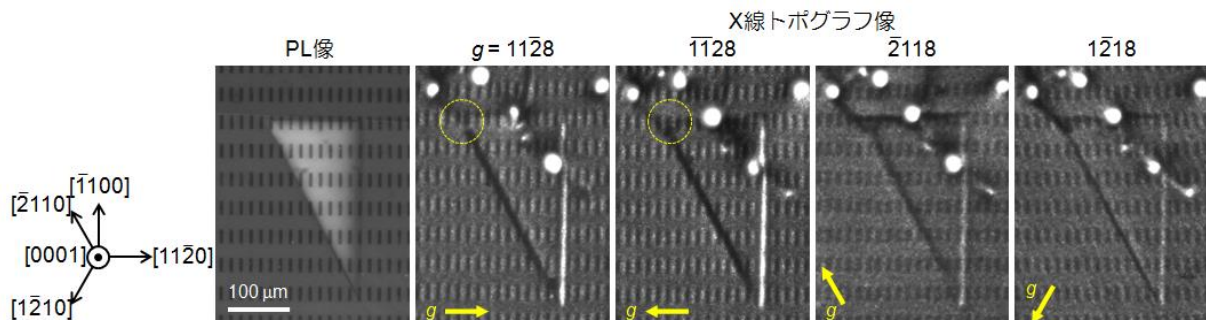


図 4-3 三角状 SF の PL 及び各反射の X 線トポグラフ像

ストに着目すると、 $g=11\bar{2}8$ においては白、 $g=\bar{1}\bar{1}28$ においては黒のコントラストを示す。これよりTEDのバーガースベクトル b_{TED} は、 $1/3[2\bar{1}\bar{1}0]$ もしくは $1/3[1\bar{2}10]$ であることが分かった。これらの結果から、起源となるBPDは $b_{BPD}=1/3[2\bar{1}\bar{1}0]$ と特定することができた。この方法により各SFについて起源となるBPDの b_{BPD} を調査し、特定できないSFについてはPL及びX線トポグラフィ法により拡張起点付近を推測し、TEMにより観察することで全てのSFについて起源となるBPDの b_{BPD} を調査した。その結果、電流密度に対する b_{BPD} に傾向は認められなかった。以上の結果から、TED転換BPDにおけるSF拡張開始電流密度のばらつきには、 b_{BPD} でなく別の要因が寄与していると考えられる。

5. 今後の課題

上記4に示すように、低電流密度でSF拡張する貫通BPDに対してTED転換BPDは高い電流密度までSF拡張しないことが分かった。また、TED転換BPDにおけるSF拡張電流密度のばらつきは、BPDのバーガースベクトルに起因しないことが明らかとなった。この結果に対して、別要因を検討する必要があり、SF拡張起点について更に詳細な調査が求められる。今後は起源となるBPDのTED転換深さ、周辺の結晶欠陥等による歪等の要因について検討するため、X線トポグラフィ法、PL、TEMを組み合わせた詳細な調査を継続的に行う。

6. 参考文献

- [1] M. Skowronski and S. Ha, *J. Appl. Phys.* **99**, 011101 (2006).
- [2] A. Tanaka, *et. al.*, *J. Appl. Phys.* **119**, 095711 (2016).
- [3] I. Kamata, *et. al.*, *Appl. Phys. Lett.* **97**, 172107 (2010).
- [4] H. Tsuchida, *et. al.*, *Phys. Status Solidi B* **246**, 1553 (2009).
- [5] H. Matsuhata, *et. al.*, *Philos. Mag.* **94**, 1674 (2014).

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)

X-ray topography、SiC、stacking fault