

X線トポグラフィーによる4H-SiC中に形成された結晶欠陥の評価

山下任^{1,2}、着本享^{1,3}、林将平^{1,4}、周防裕政^{1,2}、小松直佳¹、山口博隆¹、

江藤数馬¹、升本恵子¹、浅水啓州^{5,1}

¹(国)産業技術総合研究所, ²昭和電工(株), ³JFEテクノロジー(株),

⁴(株)東レリサーチセンター, ⁵ローム(株)

1. はじめに

電力エネルギー変換を高効率に行うためのワイドギャップ半導体材料の一つとして、4H シリコンカーバイド (4H-SiC) を用いたデバイスが既に実用化されるに至っている。結晶成長技術の向上により、4H-SiC 中の結晶欠陥は低減されつつあるものの、一定程度の結晶欠陥が依然として存在しており、デバイスの特性不良や信頼性低下を引き起こすことが懸念される。そのため、結晶欠陥観察を、バルク結晶成長、ウェーハ加工、エピタキシャル成長、デバイス開発等、各工程間で連携しながら進め、欠陥の性状、発生原因、デバイス性能への影響等の諸問題を解決していく必要がある。我々はこれまで、九州シンクロトロン光研究センターにおいて X 線トポグラフィーによる結晶欠陥評価を実施し、これらの問題に取り組んできた^[1-3]。特に近年では、超高耐圧バイポーラデバイス (IGBT) を中心に、その実用化にむけた研究の一環として、これら結晶欠陥評価を推進している。

本稿では、我々が各工程における X 線トポグラフィーによる結晶欠陥評価を進めた中から、事例を幾つか報告する。

2. 実験

2-1 試料

各工程を経た 4H-SiC 単結晶ウェーハを観察の対象とした。ウェーハサイズは通常 3~4 インチ径であるが、デバイス化プロセスを経たウェーハの場合は、大きさが数 mm~数 10 mm 角である。また、ウェーハ表面方位は(0001)面に対して、オフ角を有している。代表的なオフ角方向は[11-20]方向で、オフ角の大きさは4°である。

2-2 実験方法

X 線トポグラフの観察は、九州シンクロトロン光研

究センターの BL15 を用いて実施した。主に 4H-SiC ウェーハ表面の欠陥を評価するため、反射配置での X 線トポグラフ観察を行った。標準的な回折条件は、X 線波長は 0.15 nm で、反射面は入射角が小さくなる -1-128 とした。この場合、入射角 $\alpha=6.99^\circ$ 、回折角 $2\theta=100.5^\circ$ となる。なお、目的に応じて、異なる反射面での観察も行った。トポグラフ観察時の典型的な光学配置を図 1 に示した。X 線トポグラフは、ILFORD 製の原子核乾板に記録した。

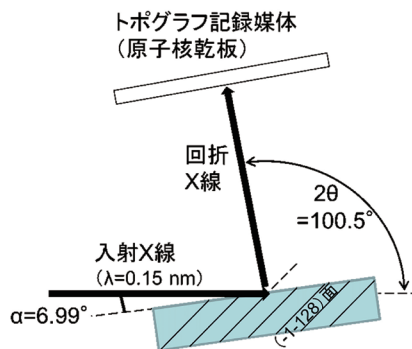


図1 SiC ウェーハの斜入射 X 線トポグラフ光学配置

3. 結果及び考察

3-1 p 型 4H-SiC 結晶欠陥密度のドーパント濃度依存性^[4]

我々は高耐圧 IGBT 向けの結晶として、高品質、低抵抗 p 型 4H-SiC 結晶の開発を進めている。本節では、結晶成長技術開発の一環として、結晶欠陥生成と Al ドーピング濃度との関係について検討を行った結果を示す。図 2 には、p 型 4H-SiC 結晶から得られた X 線トポグラフを示した。貫通刃状転位 (TED) と貫通螺旋転位 (TSD) が主に観察された。このような X 線トポグラフィー及び KOH エッチングで評価した TED 密度を、Al ドーピング濃度に対してプロットしたものを図 3 に示した。図 3 中縦軸の TED 密度は、成長に用いた種結晶に対する相対値を示している。Al

濃度が $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 付近の p 型結晶では、種結晶に対する TED 密度はほぼ 1 であるのに対して、Al 濃度が高くなるにつれて TED 密度が増大するような傾向が確認された。種結晶と p 型成長結晶でのドーパント濃度の著しい差が結晶歪みを生じさせ、成長界面での欠陥発生に影響していることが示唆された。

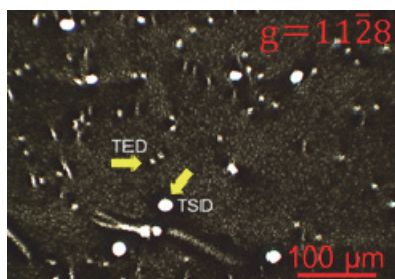


図 2 p 型 SiC ウェーハの X 線トポグラフ ($g=11-28$)

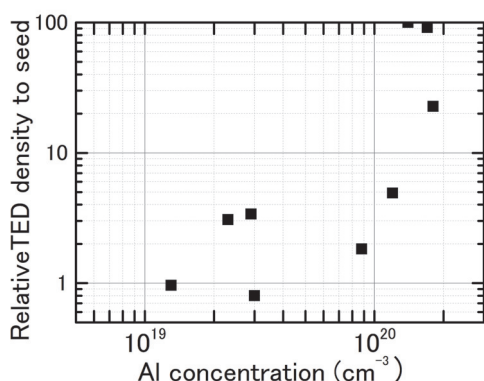


図 3 p 型 SiC ウェーハ中 TED 密度の Al 濃度依存性^[4]

3-2 p 型 4H-SiC 基板上エピタキシャル膜成長と転位評価^[5]

前節で示した p 型 4H-SiC 結晶の開発と並行して、p 型基板を用いたエピタキシャル成長の技術開発を進めることも重要である。本節では、p 型基板上に成長したエピタキシャル膜の転位評価を行った結果を示す。図 4 には、通常のオフ方向である [11-20] オフ方向の基板を用いて成長したエピタキシャル膜の X 線トポグラフを示した。基底面転位 (BPD) が高密度に発生していることが確認された。高密度 BPD の形成は、基板に添加された高濃度 Al に起因していると示唆される。これに対して、図 5 に示した、[01-10] オフ方向基板を用いて成長したエピタキシャル膜の X 線トポグラフからは、[11-20] オフ方向のときと比較し、BPD が大幅に低減していることが分かる。オフ方向に平行なバーガスベクトル

を有する BPD は、エピタキシャル成長時に TED に変換されにくいことが報告されており^[6]、基板中 BPD のバーガスベクトルとオフ方向が平行でない [01-10] オフ基板を用いることでエピタキシャル成長初期における BPD から TED への変換が促進され、エピタキシャル膜中 BPD 密度が低減されたと考えられた。

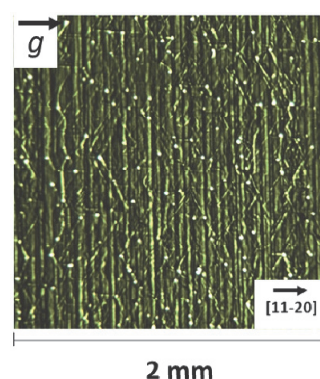


図 4 [11-20] オフ p 型基板上エピタキシャル膜の X 線トポグラフ ($g=11-28$)。スジ状コントラストが BPD

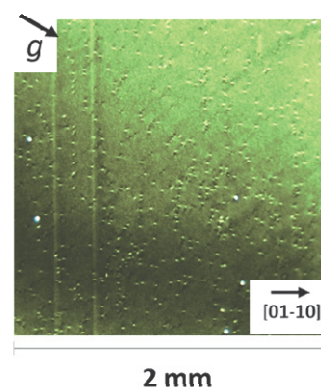


図 5 [01-10] オフ p 型基板上エピタキシャル膜の X 線トポグラフ ($g=11-28$)。

3-3 透明導電性電極を用いた 4H-SiC PiN ダイオードの順方向通電劣化の評価^[7]

デバイス動作による特性劣化は、結晶欠陥の構造変化によって引き起こされることが知られており^[8]、我々もこれまで動作後のデバイスの X 線トポグラフによる結晶欠陥観察を実施してきている^[9]。デバイスの通電劣化試験は、実デバイスと同様の電極構造を作製して実施されるが、通電後の結晶欠陥構造変化の観察のためには、電極の剥離工程が必要となる。そこで、電極剥離を行わずに X 線トポグラフィ、フォトルミネッセンス (PL) 等による結晶欠陥観察を行うべく、透明導電性酸化物 (ITO) 電極を用いた素子を試作し、結晶欠陥評価を行った例を本節で

示す。ITO アノード電極を有する SiC PiN ダイオード構造(1 mm²)への順方向通電により拡大した、積層欠陥の PL(420 nm バンドパスフィルター (BPF))像を図 6 に、積層欠陥起点周辺の X 線トポグラフを図 7 に示した。いずれも、電極を剥離せず、ITO 電極越しに欠陥が観察出来ることが確認された。特に図 7 に示す X 線トポグラフからは、基板中の BPD からエピ中 TED へ転換している箇所の近傍から、積層欠陥の部分転位のコントラストが生じている様子が観察され、金属アノード電極の場合と同様の欠陥拡張構造⁶⁾を有していることが示唆された。

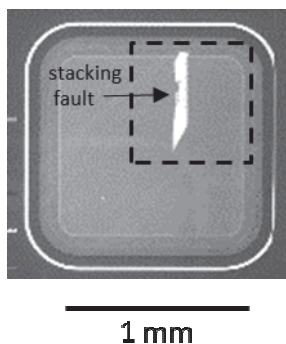


図 6 通電により拡大した積層欠陥の PL (420nmBPF) 像⁷⁾。白いコントラストが積層欠陥。

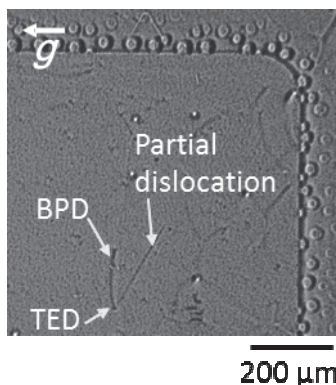


図 7 拡大した積層欠陥起点周辺の X 線トポグラフ ($g = -1\cdot 128$)。図 6 の口の領域から⁷⁾。

4. まとめ

本稿では、X 線トポグラフィによる 4H-SiC の結晶欠陥評価を進めた事例を報告した。X 線トポグラフィは詳細な結晶欠陥情報が非破壊で得られる手法として極めて有用であるが、上流工程～下流工程間の要所々々での結晶欠陥評価を行うことが、欠陥の性状、発生原因、デバイス性能への影響等の諸問題を効率よく解決して行く上で重要であると考えられる。

5. 謝辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議の SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) 「次世代パワーエレクトロニクス/SiC 次世代パワーエレクトロニクスの統合的研究開発」(管理法人: NEDO) によって実施されました。

X 線トポグラフ観察において、多大なご指導、ご協力をいただきました、九州シンクロトロン光研究センターの石地耕太郎博士に深謝いたします。

参考文献

- [1] 山口博隆 他, “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 (I)”, 九州シンクロトロン光研究センター利用報告書 (2016).
- [2] 山口博隆 他, “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)”, 九州シンクロトロン光研究センター利用報告書 (2016).
- [3] 山口博隆 他, “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 (III)”, 九州シンクロトロン光研究センター利用報告書 (2016).
- [4] 江藤数馬 他, “昇華法による Al 高濃度ドープ p 型 4H-SiC の結晶成長と評価”, 先進パワー半導体分科会誌 第 4 回講演会予稿集, 157-158 (2017).
- [5] 升本恵子 他, “溶液法低抵抗率 p 型 SiC 基板上へのエピタキシャル成長のオフ角依存性”, 先進パワー半導体分科会誌 第 4 回講演会予稿集, 37-38 (2017).
- [6] H. Tsuchida et al., “Formation of extended defects in 4H-SiC epitaxial growth and development of a fast growth technique”, Phys. Status Solidi B **246** No.7 1553-1568 (2009).
- [7] 浅水啓州 他, “透明導電性酸化物電極を用いた 4H-SiC PiN diode における順方向通電劣化の評価”, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集, 13-208 (2017).
- [8] M. Skowronski et al., “Degradation of hexagonal silicon-carbide-based bipolar devices”, J. Appl. Phys. **99**, 011101 (2006).
- [9] 林将平 他, “4H-SiC PiN ダイオードの順方向通電劣化における積層欠陥拡張起点解析”, 先進パワー半導体分科会誌 第 4 回講演会予稿集, 21-22 (2017).