

(様式第5号)

ダイヤモンド単結晶及び
酸化ガリウム単結晶のX線トポグラフィー観察
X-ray topography observation of Diamond single crystal and Ga₂O₃ single crystal

嘉数 誠, 榎谷 聡士, 森林 朋也, 片桐 英鉄
Makoto Kasu, Satoshi Masuya, Tomoya Moribayashi, Eitetsu Katakiri

佐賀大学大学院 工学系研究科
Graduate School of Engineering, Saga University

- ※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)

ダイヤモンドや酸化ガリウムは広いバンドギャップ、高い絶縁破壊電界や優れた熱伝導率などから次世代のパワーデバイス材料として期待されている。半導体デバイスは下地となる単結晶基板上に作製されるが、基板結晶中の格子欠陥は素子特性に影響を与え課題である。そのためこれらの抑制や制御技術のため、欠陥の観察や同定が必要である。そこで本研究では、ダイヤモンド単結晶及び酸化ガリウム単結晶の結晶欠陥に関して、X線トポグラフィーにより観察しこれらの同定を行った。

(English)

Diamond and Gallium oxide are wide band gap semiconductor, and are expected as high-efficient high-power device. However, defects in diamond crystals lead to a leakage current and decrease the breakdown voltage. Therefore, to minimize the defect density, it is critical to understand crystal defects such as dislocations and stacking faults. Then, we performed X-ray topography to observe and characterize crystal defects in diamond and Gallium oxide single crystal.

2. 背景と目的

我々はこれまで新しい電子材料の創製とそれを生かしたデバイス応用に関する研究を行ってきた。現在は、シリコンカーバイド(SiC)、窒化ガリウム(GaN)、窒化アルミニウム(AlN)、ダイヤモンド、β-Ga₂O₃等の広いバンドギャップをもつ新しい半導体の創製とそれをを用いた低損失・高耐圧のパワーデバイスの応用に関する研究を行っている。

環境・エネルギー問題は、今や不可避の深刻な社会問題である。エレクトロニクス、情報通信ネットワーク、電力ネットワークのエネルギー効率率は、システムのハードウェアの大部分を占めるシリコン(Si)材料の固有の物性限界に到達している。それを打破するために、Siよりバンドギャップが広いSiCやGaNや、新しいワイドギャップ半導体であるダイヤモンドや酸化ガリウムを用いた高効率パワーデバイスの実用化に繋げ、エネルギー問題を根本的に解決することが最大の目標である。

本研究では、次世代半導体として期待されているダイヤモンドとβ-Ga₂O₃に関して測定を行う。ダイヤモンドの観察試料は高温高压(HPHT)合成した(001)面単結晶である。反射ブラッグ配置で転位や積層欠陥の観察を行う。また、β-Ga₂O₃の結晶欠陥に関しては、未だに報告が少ないため、(001)面や(-201)面結晶のX線トポグラフィー観察を行い、転位や積層欠陥の観察を行う。

3. 実験内容 (試料, 実験方法, 解析方法の説明)

ダイヤモンドの測定はHPHT成長した(001)面単結晶を用いた[1]. 反射ブラッグ配置で $g=\{404\}$ の回折を測定した. 回折条件を変化させながらコントラスト実験により転位のバーガーズベクトルの同定を行う.

$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の測定に関しては, 融液成長の一つであるEFG法により成長した単結晶基板を測定した[2]. 今回(001)面, (-201)面に切り出した基板を用いた. この結晶を用いて反射ブラッグ配置でX線トポグラフィーを行った.

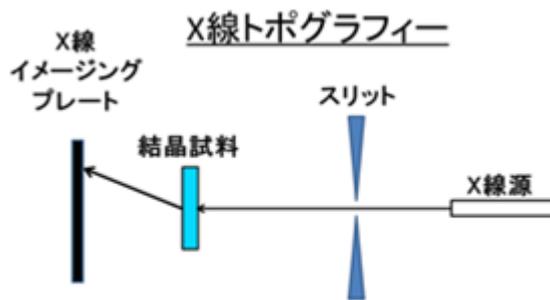


図1 X線トポグラフィー測定方法

4. 実験結果と考察

ダイヤモンド単結晶において, これまで報告されているように $\{111\}$ 成長セクターに転位や積層欠陥が観察され, $\{001\}$ 成長セクターには積層欠陥はほとんどなく, 低密度の転位が観察された[3]. コントラスト実験の結果, これらの転位は刃状転位と混合転位であり, 積層欠陥はショックレー型であることがわかった. また(001)成長セクターは成長方向に沿って転位が発生しているのに対して, $\{111\}$ 成長セクターは成長方向から斜めに転位が発生していることがわかった.

$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 単結晶においても, これまで観察してきた結果と同様に $[010]$ 方向に沿った転位が観察された[4]. こちらの転位はコントラスト実験からバーガーズベクトルが $\langle 010 \rangle$ であることがわかった. 転位の伝搬方向, バーガーズベクトルともに $\langle 010 \rangle$ であることかららせん転位であること同定した. また $[010]$ 方向への転位列が観察され, その転位列を境に回折が急激に変化していることから面の傾き(反り)を形成していることがわかった. これらの傾きとバーガーズベクトルとの対応を今後調べていく.

5. 今後の課題

次世代のパワー半導体として注目される酸化ガリウム単結晶及びダイヤモンド単結晶のシンクロトロン放射光を用いたX線トポグラフィー観察を行い結晶欠陥の評価を行った.

ダイヤモンド単結晶においてはHPHT成長した単結晶を観察し, 転位や積層欠陥の同定を行った. 今後これらの低減へ向けた研究へ展開していく事が課題である.

$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 単結晶において様々な回折条件で測定を行い, コントラスト実験から, ほとんどの転位でバーガーズベクトルを $\langle 010 \rangle$ と同定することが出来た. 一部の転位はらせん転位であることがわかったが, 今後更に詳細に調べていく. また結晶面の反り, 転位の形成メカニズムに関して今後考察を進めていく予定である.

6. 参考文献

- [1] H. Sumiya, K. Tamasaku, "Large Defect-Free Synthetic Type IIa Diamond Crystals Synthesized via High Pressure and High Temperature", Japanese Journal of Applied Physics 51 (2012) 090102.
- [2] A. Kuramata, K. Koshi, S. Watanabe, Y. Yamaoka, T. Masui, S. Yamakoshi, Japanese Journal of Applied Physics, 55 (2016) 1202A2.
- [3] M. Kasu, R. Murakami, S. Masuya, K. Harada, and H. Sumiya, Synchrotron X-ray topography of dislocations in high-pressure high-temperature-grown single-crystal diamond with low dislocation density, Applied Physics Express, 7 (2014) 125501.
- [4] O. Ueda, N. Ikenaga, K. Koshi, K. Iizuka, A. Kuramata, K. Hanada, T. Moribayashi, S. Yamakoshi, M. Kasu, Japanese Journal of Applied Physics, 55 (2016) 1202BD.

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)

- [1] M. Kasu, R. Murakami, S. Masuya, K. Harada, and H. Sumiya, Synchrotron X-ray topography of dislocations in high-pressure high-temperature-grown single-crystal diamond with low dislocation density, Applied Physics Express, 7 (2014) 125501.
- [2] S. Masuya, K. Hanada, T. Uematsu, T. Moribayashi, H. Sumiya, M. Kasu, Determination of the type of stacking faults in single-crystal high-purity diamond with a low dislocation density of $<50\text{cm}^{-2}$ by synchrotron X-ray topography, Japanese Journal of Applied Physics 55, (2016) 040303
- [3] S. Masuya, K. Hanada, T. Moribayashi, H. Sumiya, M. Kasu, Determination of partial dislocations of stacking fault in (111) single crystal diamond grown on (111) seed crystal by synchrotron X-ray topography, Journal of Crystal Growth, 468 (2017) 439.

[4]S. Masuya, K. Hanada, T. Oshima, H. Sumiya, M. Kasu, "Formation of stacking fault and dislocation behavior during the high-temperature annealing of single crystal HPHT diamond", *Diamond and Related Materials* **75** (2017) 155.

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)

ダイヤモンド, 酸化ガリウム, X線トポグラフィー

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。(2017年度実施課題は2019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: 2018年3月)