



九州シンクロトロン光研究センター 県有ビームライン利用報告書

課題番号：1811114S

BL番号：BL09

(様式第5号)

β -Ga₂O₃ バルク単結晶の X 線トポグラフィー観察
X-ray topography observation of β -Ga₂O₃ single crystal.

嘉数 誠, 柘谷聡士, 松藤 遼, 波佐翔馬
片桐英鉄, 伊藤大悟, Sdoeung Sayleap

Makoto Kasu, Satoshi Masuya, Ryo Matsufuji
Syoma Haza, Eitetsu Katagiri, Daigo Ito, Sdoeung Sayleap

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。しかし、半導体デバイスの下地となる単結晶基板中の格子欠陥(結晶欠陥)は、素子特性に影響を与えるため課題である。

実際に β -Ga₂O₃ を用いたショットキーバリアダイオードにおいて、転位などの欠陥がリーク電流を引き起こすことが報告されている[1]。従って、 β -Ga₂O₃ においても結晶欠陥の抑制や制御が不可欠であることが明らかになった。結晶欠陥に関する報告も増えてきたが[2, 3]、未だわかっていない部分も多く、更なる研究が必要である。本研究ではEFG法により成長した β -Ga₂O₃ 単結晶の X 線トポグラフィー観察を行い、結晶欠陥の観察を行った。

(English)

Diamond and Gallium oxide are wide band gap semiconductor, and are expected as high-efficient high-power electronics device. However, defects in crystals lead to a leakage current and decrease the breakdown voltage.

It has been reported that dislocations in β -Ga₂O₃ cause leakage current by Schottky diode. Therefore, to minimize the defect density, it is critical to understand crystal defects such as dislocations and stacking faults. Although some reports about defects in β -Ga₂O₃ has been reported, further investigation is necessary. In this study, we investigated the defects in β -Ga₂O₃, using X-ray topography.

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。

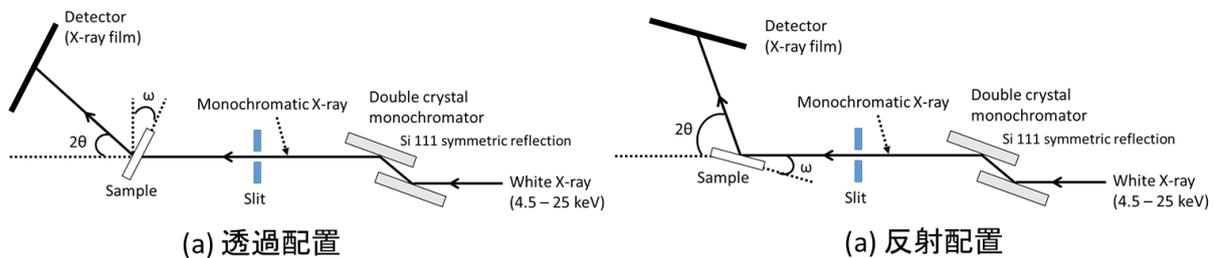
環境・エネルギー問題は、今や不可避の深刻な社会問題である。エレクトロニクス、情報通信ネットワーク、電力ネットワークのエネルギー効率、システムのハードウェアの大部分を占めるシリコン(Si)材料の固有の物性限界に到達している。それを打破するために、Siよりバンドギャップが広いSiCやGaNや、新しいワイドギャップ半導体であるダイヤモンドや酸化ガリウムを用いた高効率パワーデバイスの実用化に繋げ、エネルギー問題を根本的に解決することが最大の目標である。しかしながら、半導体結晶を用いて作製される電子デバイス・光デバイスの特性は、その結晶中の格子欠陥の物性に大きく左右される。例えば、線状欠陥である転位は格子歪、欠陥準位、局所反応サイトなどを与え、多くの場合、デバイス特性を悪化させる要因となる。そのため結晶欠陥の観察や評価は、産業応用に向けた重要な課題である。我々はこれまでにX線トポグラフィ測定によりダイヤモンド単結晶や $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 単結晶の転位や積層欠陥の観察と同定を行ってきた。 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ に関しては、これまで反射トポによる表面近傍の観察を行い、二次元像として欠陥の観察を行ってきた。しかし、これらの欠陥が実際に電子デバイスに与える影響はわかっていない。そのため、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 半導体の素子特性向上のために、キラー欠陥となるものを理解しておく必要がある。そこで本研究ではX線トポグラフィにより観察した欠陥が電子デバイスに与える影響について調べた。

3. 実験内容 (試料、実験方法、解析方法の説明)

VB法を用いて作製した $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 単結晶について、結晶内部に存在する欠陥の観察を行う。特に転位に関してはバーガズベクトルを同定する為、それぞれの基板で様々な回折条件下で測定を行う。

測定試料はVB成長 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 単結晶である。表面は(100)面であり、直径26mmの円形をしている。Gaによる吸収が大きいため、ほとんどの測定は反射Bragg配置で行う。 g ベクトルは出来るだけ多くのパターンで測定し、得られたトポグラフィ像を比較し、欠陥コントラストの消滅則により、転位のバーガズベクトルを同定する。

測定条件(X線エネルギー、試料配置など)は測定試料の面方位、観察範囲(表面からの深さ)によって変更するが、ブラッグ条件に当てはめ条件を決定する。



4. 実験結果と考察

今回用いた試料で測定した透過像は、コントラストがかなり薄くなっており、欠陥の観察は難しかった。動力学回折効果を起こすためには、更なる結晶品質の向上、もしくは板状結晶作製後の研磨等が必要であると思われる。その中でも、露光時間を増やせば $g=020$ の回折は比較的、強く回折しており、欠陥を観察するにも十分の透過像が得られた。しかし、透過配置による欠陥の同定、セクショントポグラフィの測定などを行うためには、まだ不十分な結果と思われる。

次に欠陥の比較を行うために、この試料を用いて、反射Bragg配置での測定も行った。透過像で見た場合と反射像で見た場合、それぞれの欠陥を対応させることが出来た。(100)面から観察した場合も今まで通り、 $\langle 010 \rangle$ 方向へ欠陥が発生していることが観察できた。

5. 今後の課題

次世代のパワー半導体として注目される $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ のシンクロトロン放射光を用いたX線トポグラフィ観察を行った。これまで反射Bragg配置での測定が主流だったので、今回は透過Laue配置での測定を行った。しかし、透過像のコントラストは非常に薄く、欠陥の観察は困難だった。そのため、今後は更なる結晶品質の向上と、表面加工の精密化が課題である。

6. 参考文献

- [1] M. Kasu, *et al.*, Japanese Journal of Applied Physics 55, 1202BB (2016).
[2] O. Ueda, *et al.*, Japanese Journal of Applied Physics 55, 1202BD (2016).
[3] H. Yamaguchi, *et al.*, Superlattices and Microstructures 99, 99 (2016).

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)

$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, 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:

2021年 3月)