



# 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： 2202002S

BL番号： BL09

(様式第 5 号)

X 線トポグラフィーによる HVPE 酸化ガリウムエピタキシャル層の転位の特性解明  
Determination of dislocations in HVPE gallium oxide epitaxial layer determined by X-ray  
topography

嘉数 誠, Sdoeung Sayleap

中原 健太

Makoto Kasu, Sdoeung Sayleap,

Kenta Nakahara

佐賀大学大学院 理工学研究科

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）

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  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  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。従って、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  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、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。最近、垂直ブリッジマン(VB)法で育成した  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  単結晶[5]は低転位密度で、最高品質の水準の結晶であることがわかった。

実験の手法は、これまでと同様に、様々な回折( $g$ )ベクトルを変えて、X線トポグラフィー(XRT)像を撮像し、 $g \cdot b = 0$  を満たしたときにコントラストが消失する原理を用い、バーガーズ( $b$ )ベクトルを同定する。実験では、実用可能な4インチウエハの観察を行う。モノクロのX線入射角度を変えて、X線光子エネルギーを変えながら、4インチ全体像を撮像しなければならないため、撮像時間を要した。大学では、エミッション顕微鏡を用いて、リーク箇所を同定し、その位置関係とXRT像との対比から、キラ欠陥を同定した。今回は、特に、一次元欠陥である転位に注目して、観察を行った。

## (English)

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  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  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. Recently we obtain high-quality vertical Bridgeman (VB) grown  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ .

In this study, we investigated one-dimensional defects, so-called dislocations, in HVPE-grown  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> epi layers.

## 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,  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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。

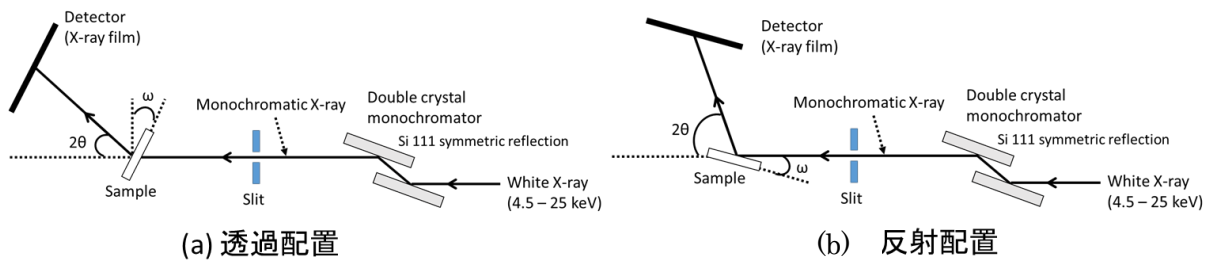
環境・エネルギー問題は、今や不可避の深刻な社会問題である。エレクトロニクス, 情報通信ネットワーク, 電力ネットワークのエネルギー効率, システムのハードウェアの大部分を占めるシリコン(Si)材料の固有の物性限界に到達している。それを打破するために, Si よりバンドギャップが広い SiC や GaN や, 新しいワイドギャップ半導体であるダイヤモンドや酸化ガリウムを用いた高効率パワーデバイスの実用化に繋げ, エネルギー問題を根本的に解決することが最大の目標である。しかしながら, 半導体結晶を用いて作製される電子デバイス・光デバイスの特性は, その結晶中の格子欠陥の物性に大きく左右される。例えば, 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 線トポグラフィー測定によりダイヤモンド単結晶や  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 単結晶の転位や積層欠陥の観察と同定を行ってきた。 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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,  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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。

我々は, これまで HVPE 成長の高品質の  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> エピ薄膜結晶で, 様々な種類のキラー欠陥を同定したが, 今回は, 一次元欠陥である転位に注目して XRT 観察を行い, 分布や特性を調べた。

## 3. 実験内容 (試料, 実験方法, 解析方法の説明)

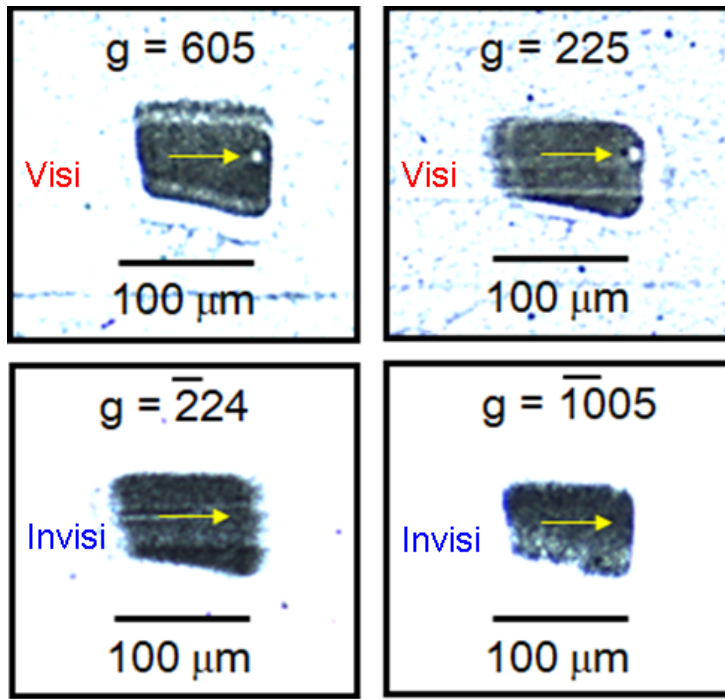
実験の手法は, これまでと同様に, 様々な回折( $g$ )ベクトルを変えて, X 線トポグラフィー (XRT) 像を撮像し,  $g \cdot b = 0$  を満たしたときにコントラストが消失する原理を用い, バーガーズ ( $b$ ) ベクトルを同定した。実験では, 実用可能な 4 インチウエハの観察を行った。モノクロの X 線入射角度を変えて, X 線光子エネルギーを変えながら, 4 インチ全体像を撮像しなければならないため, 撮像時間を要した。

大学では, エミッション顕微鏡を用いて, リーク箇所を同定することができ, その位置関係と XRT 像との対比から, キラー欠陥を同定した。



#### 4. 実験結果と考察

今回 HVPE  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> エピ薄膜結晶をシンクロトロン X 線トポグラフィー観察した。下記のような転位が観察された。現在、特性を解析中である。



#### 5. 今後の課題

今回の観察により、ウエハ上の SBD に影響を与える転位を同定し、その転位密度を低減することにより、SBD の特性を向上させることができた。X線トポグラフィーや AFM や断面 TEM などを利用して欠陥の分布や種類の傾向に関して、より詳しく調べていく。

#### 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.

[5] S. Sdoeung, K. Sasaki, K. Kawasaki, J. Hirabayashi, A. Kuramata, T. Oishi, and M. Kasu, "Origin of reverse leakage current path in edge-defined film-fed growth (001)  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Schottky barrier diodes observed by high-sensitive emission microscopy", Applied Physics Letters 117, 022106 (2020).

[6] S. Sdoeung, K. Sasaki, K. Kawasaki, J. Hirabayashi, A. Kuramata, and M. Kasu, "Polycrystalline defects—origin of leakage current—in halide vapor phase epitaxial (001)  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Schottky barrier diodes identified via ultrahigh sensitive emission microscopy and synchrotron X-ray topography", Applied Physics Express 14, 036502 (2021).

[7] S. Sdoeung, K. Sasaki, S. Masuya, K. Kawasaki, J. Hirabayashi, A. Kuramata, and M. Kasu, "Stacking faults: Origin of leakage current in halide vapor phase epitaxial (001)  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Schottky barrier diodes", Appl. Phys. Lett. 118, 172106 (2021)

**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)

$\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC, 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 9月)