

(様式第5号)

## X線トポグラフィーによるHVPE成長 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の欠陥の観察 Observation of defects in HVPE-grown $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by X-ray topography.

嘉数 誠, 梶谷聡士, 松藤 遼, 波佐翔馬  
Makoto Kasu, Satoshi Masuya, Ryo Matsufuji, Shoma Haza

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。しかし、酸化ガリウムにおいて、結晶欠陥が電子デバイスに与える具体的な影響は知られていない。そこで本研究では、リーク電流や耐圧低下につながる欠陥(いわゆるキラ欠陥)の同定を行うため、X線トポグラフィーにより、 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の結晶欠陥を観察した。

### (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 is not known the effects of defects on electrical properties by  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. In this study, we measured the I-V characteristics and X-ray topography by same sample. Then we investigate the effects of defects on electrical properties.

### 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 X 線トポグラフィーにより  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  単結晶中の結晶欠陥の観察と同定を行ってきた。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 線トポグラフィー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)

観察試料は Edge-defined Film-fed Growth (EFG) 法により成長した  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  単結晶基板上に、ハライド気相成長 (HVPE) 法でホモエピ成長した  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  である [1]。はじめに、この試料を用いて、ショットキーバリアダイオード (SBD) を作製し、電流-電圧特性を測定した。その後、電極等を除去し、HVPE エピ面を表面に露出させた状態にした。

この試料に対して、図 1 に示す反射 Bragg 配置により  $g=605$  等の反射トポを測定し、転位等の欠陥の観察を行う。この時、試料角度や X 線エネルギーを調整し、X 線の侵入深さがエピ膜内で収まるように測定した。SBD 特性において、リーク電流や特性不良が確認された領域で、どのような欠陥が含まれているか調べた。

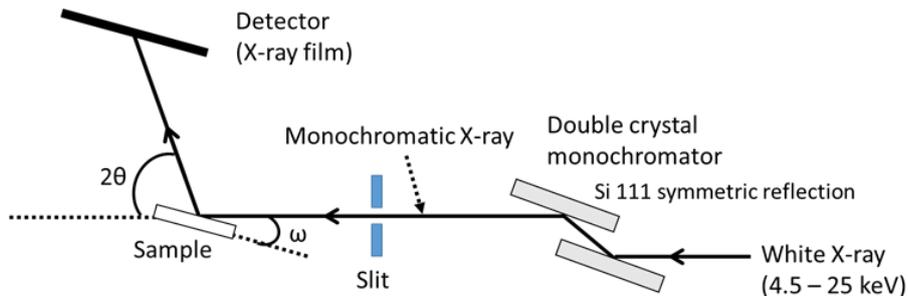


図 1 X 線トポグラフィー装置図

### 4. 実験結果と考察

得られたトポ像では欠陥として主に転位が観察された。HVPE 結晶特有の基板結晶からの貫通転位と思われる。また、HVPE 成長時のガス下流側には、ガス経路内で反応した非エピタキシャル成分が観察された。

SBD の電流-電圧特性と比較すると、非エピタキシャル成分が多いガス下流側で特性の劣化やリークが多いことが確認された。また、一部の転位においてリーク電流が発生していることもわかった。しかし、全ての転位においてリーク電流が発生しているわけではなかった。今後、これらの転位をバーガーズベクトルや転位の構造の観点から考察する必要がある。また、表面の傷 (ピンセットなどのひっかけ傷、いわゆる長距離歪) では特性が大きく劣化していることもわかった。

### 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 線トポグラフィー観察を行った。SBD 特性と結晶欠陥を比較し、キラー欠陥となるものを同定した。結果、一部の転位においてリーク電流が発生していることがわかった。しかし、他の転位では素子特性に影響を与えていなかったため、今後はこれらの違いをバーガーズベクトルや転位構造の観点から考察していく。また、ガス下流側の非エピタキシャル成分が多く含まれる領域では素子特性が悪化している傾向があった。今後、これらの抑制や制御技術に関して考察が必要である。

## 6. 参考文献

[1] A. Kuramata, K. Koshi, S. Watanabe, Y. Yamaoka, T. Masui, S. Yamakoshi, Japanese Journal of Applied Physics, 55 (2016) 1202A2.

## 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)

$\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, HVPE, 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)