



次世代パワー半導体酸化ガリウムの格子欠陥の観察

姚 永昭^{1,2}, 勝部 大樹², 山口 博隆², 石川 由加里², 佐々木 公平³

1 三重大学, 2 ファインセラミックスセンター, 3 株式会社ノベルクリスタルテクノロジー

キーワード：酸化ガリウム, X線トポグラフィー, 転位

1. 測定実施日

2024年8月7日 BL8S2 (2シフト)

2024年8月8日 BL8S2 (2シフト)

2024年9月25日 BL8S2 (2シフト)

2024年9月26日 BL8S2 (2シフト)

2. 概要

放射光 X 線トポグラフィー (XRT) を用い、酸化ガリウム (β -Ga₂O₃) 結晶の格子欠陥の分布と構造を観察した。特に大口径ウエハの全面にわたり転位を撮影する方法を検討した。パワーデバイスの性能と信頼性の向上に向けて、欠陥のデバイスに与える影響と欠陥種類の関係性を調査するための基礎データを取得した。

3. 背景と研究目的

あらゆる電子機器において電力の変換と制御を担うパワーデバイスは、従来シリコン (Si) を原料として作られていたが、更に高性能と低損失を実現するためには、 β -Ga₂O₃ のような広いバンドギャップと高い絶縁破壊電界強度を持つ半導体材料が必要である。ところが、Si に比べて結晶成長が難しい β -Ga₂O₃ においては、格子欠陥を含まない完全な結晶を作ることが未だにできておらず、結晶欠陥が存在すると、理論的な性能が実現できないだけでなく、デバイスの長期信頼性にも懸念が生じる。 β -Ga₂O₃ 結晶の欠陥を低減するためには、欠陥分布情報と各種欠陥のデバイスに及ぼす影響を正確に知った上で成長条件を最適化することが必要であり、大面積にわたる欠陥を非破壊で検出・分類する手法の確立が重要な課題となっている^[1]。

本実験では、放射光 X 線を光源とした X 線トポグラフィーをベースにし、大口径ウエハの全面にわたり転位を撮影する方法の確立を目的とした。

4. 実験内容

XRT による転位観察の光学系は主に反射配置と透過配置に分類される。本研究では、反射配置 XRT を用いて β -Ga₂O₃ 結晶中の転位の観察を行った。Fig. 1 に反射配置 XRT の模式図を示す。撮影には (1) 対象試料の面方位、(2) X 線回折の強度、(3) 画像変形の抑制、(4) $g \cdot b$ 解析 (転位コントラストに基づいたバーガースベクトルの判別)、の 4 つの観点から、 $g = 024$ 、 $g = -10\ 05$ 、 $g = 316$ の三種類の逆空間の格子ベクトル g (g ベクトル) を選定した^[2]。使用する g ベクトルに応じて、放射光 X 線を波長 1.00~1.55 Å (X 線エネルギー 8.0~12.4 keV) に単色化し、入射角度 5 度で結晶表面に照射した。広い視野で結晶の全体を確認するためにはフラットパネル 2D 検出器を使用した。一方、局所で高い空間分解能で XRT を撮影するためには X 線 sCMOS 検出器を使用した。フラットパネルと sCMOS 検出器の視野とピクセルサイズは、それぞれ 50 mm×50 mm (50 μ m/pixel) と 13.3 mm×13.3

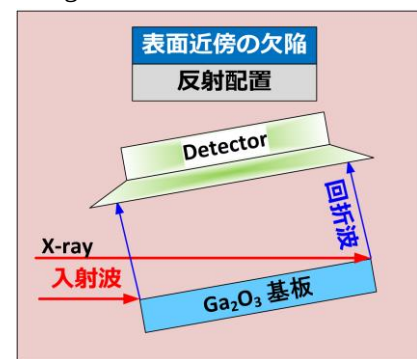


Fig. 1 反射配置 XRT の模式図

mm (6.5 $\mu\text{m}/\text{pixel}$) であった^[3]。撮影に使用した光学系を Fig. 2 に示す。

5. 結果および考察

XRT で一遍に観察できる領域の大きさは結晶の格子面のそりの程度に依存する。そのの少ない結晶では、広い範囲にわたりブラッグ条件が満たされ、転位が観察できるほどの鮮明なコントラストが得られる。一方、そのの大きい結晶の場合、視野の一部でのみ回折が起こり、それ以外の領域では回折強度が急激に低下し、転位観察が困難となる。Fig. 3 に入射角度 ω を固定した状態で撮影した 7 mm $\times$ 10 mm の結晶の XRT 像を示す。格子面の湾曲（そり）により、結晶全体を一遍に撮影することができず、中央付近帯状領域のみブラッグ条件を満たしていることがわかる。大口径の単結晶基板の転位分布を把握するために、広視野で転位を観察する方法の確立が必要である。本実験では、 ω スキャン、E スキャン（エネルギースキャン）、Z スキャン（高さスキャン）の三つの画像連結方法を検討した。 ω スキャンでは、X 線の入射角度 ω を一定のステップで変えながら、それぞれの ω において XRT 像を取得したうえで、これらの画像の最大強度合成像を作成する方法である。それに対し、E スキャンと Z スキャンは、それぞれ入射 X 線のエネルギーとサンプルの高さを変えながら撮影し、最大強度合成像で結晶全面を観察する方法である。

Fig. 4 に 5 つの異なる入射角度 ω で撮影した XRT 像とその最大強度合成像を示す。Fig. 4 左下の模式図からわかるように、 ω が変化することによって、結晶表面上の同じ点から回折された X 線は検出器の異なる位置に到達する（黒と赤の光路）ことになる。従って、単独の XRT 像に比べると、最大強度合成像においては、転位と対応する線状の白いコントラストが太くなる。即ち、 ω スキャンでは、XRT 像の空間分解能の悪化が起こる。 ω スキャンに比べて、E スキャンと Z スキャンでは、結晶と検出器の相対的位置関係が保たれるため、分解能悪化の問題は生じない。実際に、E スキャンと Z スキャンで合成した最大強度像では、画像合成に使用した単独の XRT 像と同程度の転位線幅が確認された。 ω スキャンと E スキャンで合成した同一場所の XRT 像の比較を Fig. 5 に示す。

6. 今後の課題

結晶欠陥のパワーデバイスに及ぼす影響を調べるために、広い範囲で結晶欠陥を観察する手法の検討を行った。現状、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 単結晶基板の曲率半径はまだ不十分で、数インチサイズのウエハの XRT 像をワンショットで取得す

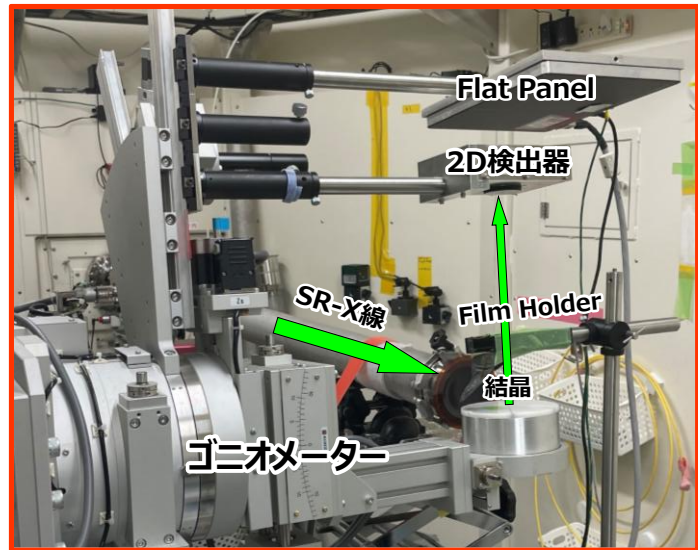


Fig. 2 反射配置 XRT の光学系

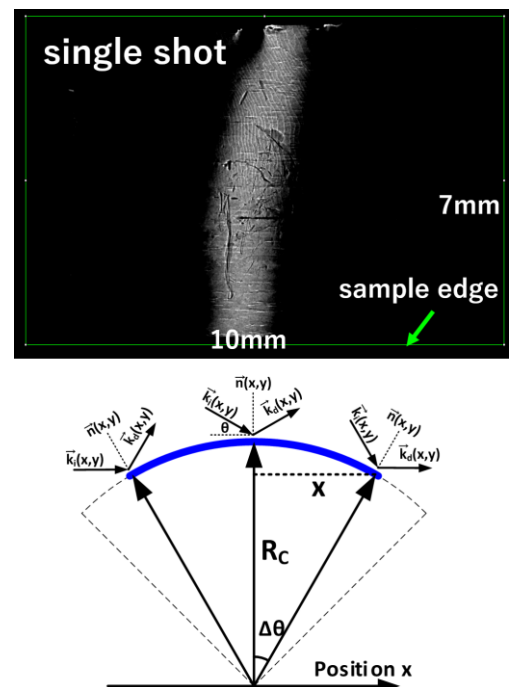


Fig. 3 （上段）格子面の湾曲（そり）により、7 mm $\times$ 10 mm の結晶の全体図を一遍に撮影することができず、中央付近帯状領域のみブラッグ条件を満たしている。（下段）そりによるブラッグ条件のズレの模式図

ることが困難である。そのため、 ω スキャン、E スキャン、Z スキャンによる画像取得と合成は結晶全面 XRT 評価に必要不可欠である。今回の実験では、 ω スキャンによる空間分解能の悪化が確認され、今後、位置補正などを行うことで、分解能の向上を図る。一方、E スキャンでは sCMOS カメラのような 2D 検出器を使用した場合は空間分解能の悪化が認められなかったものの、さらに高分解能を求め X 線フィルムで撮影する際にフィルムの X 線感度の波長依存性があるか否かを確認する必要がある。今後、これらの画像合成方法の利点と不利点を調査し、大口径の結晶の全面撮影方法を確立する。

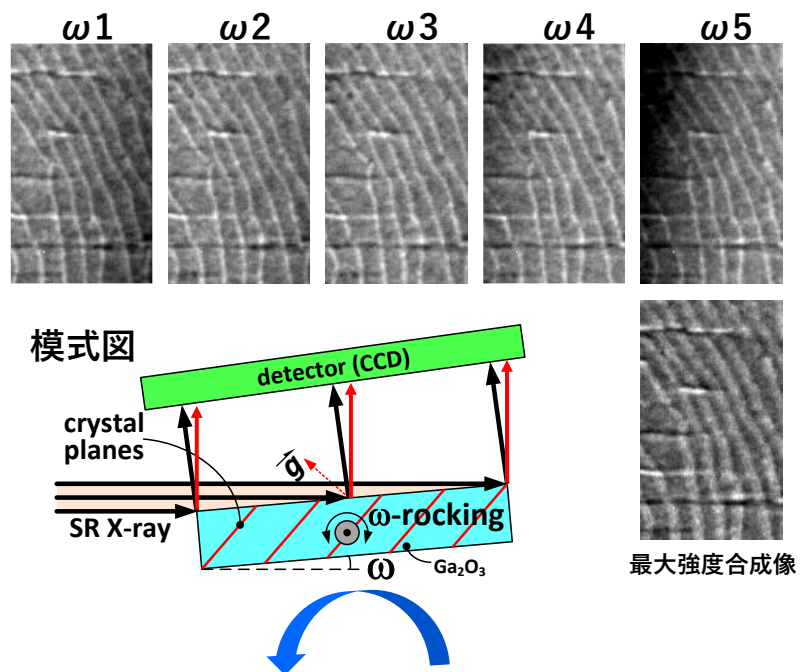


Fig. 4 5 つの異なる入射角度 ω で撮影した XRT 像とその最大強度合成像

ω スキャンによる
最大強度合成像

E スキャンによる
最大強度合成像

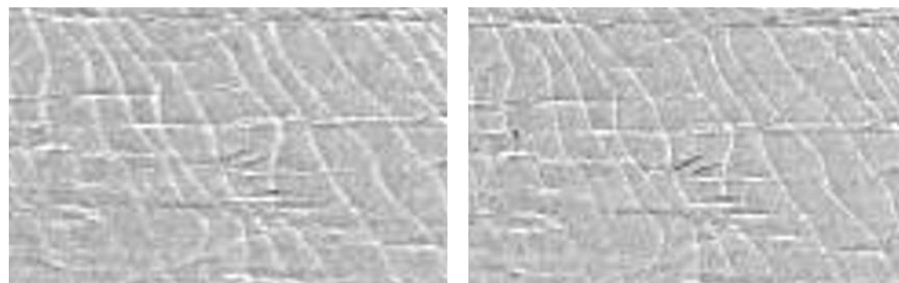


Fig. 5 (左) ω スキャン、(右) E スキャン

7. 参考文献

1. O. Ueda, M. Kasu, and H. Yamaguchi, Structural characterization of defects in EFG- and HVPE-grown β - Ga_2O_3 crystals, Jpn. J. Appl. Phys. 61, 050101 (2022).
2. Y. Yao, Y. Sugawara, and Y. Ishikawa, Identification of Burgers vectors of dislocations in monoclinic β - Ga_2O_3 via synchrotron x-ray topography, J. Appl. Phys. 127, 205110 (2020).
3. オンライン情報 : https://www.aichisr.jp/userguide/beamline_lists/BL8S2.html (あいちシンクロトロン光センター)