

奨励金No.1534

動作中の β 型 Ga_2O_3 パワーデバイスにおける結晶欠陥挙動のオペランド観測技術の開発

姚 永昭

三重大学 研究基盤推進機構 半導体・デジタル未来創造センター 教授

Development of operando observation techniques for studying crystal defect behavior in β - Ga_2O_3 power devices

Yongzhao Yao,

Innovation Center for Semiconductor and Digital Future, Organization for Research Initiative and Promotion, Mie University, Professor



本研究は、 β - Ga_2O_3 を用いたパワーデバイスの性能向上を目指し、放射光X線トポグラフィ（XRT）を活用したオペランド観測法を開発した。これにより、高電圧・大電流条件下での結晶欠陥の振る舞いをリアルタイムで観察し、デバイスの信頼性に影響する可能性のある欠陥の構造変化を明らかにした。研究では、XRTを用いて β - Ga_2O_3 基板とエピタキシャル層における欠陥の分布と特性を詳細に分析し、ショットキーバリアダイオード（SBD）デバイスに結びつけた。さらに、逆方向でのリーク電流や順方向での電圧印加時の欠陥挙動を観察し、デバイスの性能低下に関わるキラ欠陥の特定とその構造解析を行った。

This study aimed at the establishment of an operando observation method using synchrotron radiation X-ray topography (XRT) to enhance the performance of power devices based on β - Ga_2O_3 . It enabled real-time, non-destructive observation of crystal defect behavior under high voltage and current conditions, revealing structural changes in defects that could impact device reliability. The research involved precise analysis of defect distribution and characteristics in β - Ga_2O_3 substrates and epitaxial layers using XRT, correlating findings with Schottky barrier diode (SBD) devices. Furthermore, it observed defect behaviors during reverse leakage current and applied voltages exceeding operational limits, identifying killer defects and elucidating their structures to improve device performance and reliability.

1. 研究内容

カーボンニュートラルを実現する上で不可欠な重点分野である「再生可能エネルギーの利用拡大」、「自動車と鉄道の電動化」、および「産業機器と家電製品の省エネ化」の全てにおいて、あらゆる電子機器に搭載され、電力の変換と制御を担うパワーデバイスの高性能化と高効率化が強く求められている。その実現には、従来のSi半導体から優れた物性をもつSiCやGaN、 β 型 Ga_2O_3 等のワイドギャップ半導体を駆使した先進パワーデバイ

スへの移行が必須である。中でも、 β - Ga_2O_3 は、より広いバンドギャップと高い耐圧特性を持つことから、次世代の高電圧および低損失パワーデバイスの材料として注目されている。図1に材料の物性のみで決まるパワーデバイスの性能と効率の限界を示す。バンドギャップが広いほど、高性能・高効率となる[1]。

ところが、 β - Ga_2O_3 をはじめとするワイドギャップ半導体は、優れた物性を持つ一方、強い共有結合をもつ化合物であるため、結晶成長が非常に困

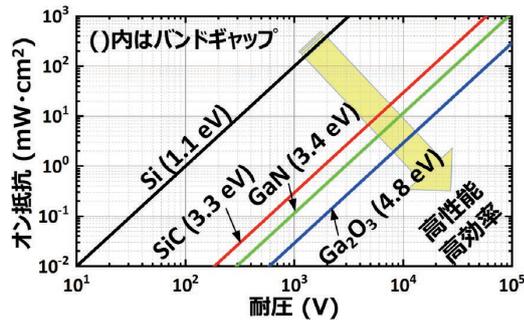


図1 シリコン (Si) とワイドギャップ半導体を用いたパワーデバイスの耐圧とオン抵抗の関係

難であり、格子欠陥と呼ばれる原子配列が乱れている部分はどうしても高密度に残る。格子欠陥はデバイスの初期不良の原因だけでなく、デバイスの長期信頼性にも影響を及ぼす可能性が高い[2, 3]。しかしながら、現状では格子欠陥がどのようにデバイスの劣化を引き起こすのかは不明である。特に、高電圧および大電流条件下で動作中のデバイスに新たな欠陥が発生したり、既存の欠陥の構造が変化する可能性が考えられる。上記情報が不足する要因は、動作中のデバイスにある格子欠陥の挙動を直接に観察する手法が今までなかったことにある。

本研究では、スイッチング動作中の β - Ga_2O_3 パワーデバイスにおける格子欠陥の挙動を解明することを目指し、三次元的に欠陥を可視化するX線トポグラフィー光学系と高分解能・高速撮影技術を構築した上で、電圧・電流を印加しながらデバイス内の格子欠陥を非破壊かつリアルタイムで観察する「 β - Ga_2O_3 パワーデバイス格子欠陥のオペランド観測法」を確立することを目的とした。結晶の格子欠陥を「静的」な観察する従来の手法を変え、「動的」な欠陥観測技術を開発した。

研究目的を達成するため、(1) 三次元的に欠陥を可視化するX線トポグラフィー光学系、(2) 高分解能・高速撮影技術、(3) 欠陥像取得と電圧電流印加システムの連動技術、の三つのコア技術を確立することで、研究開発を推進してきた(図2)。

図3(a)は本研究で使用した2インチ(001)

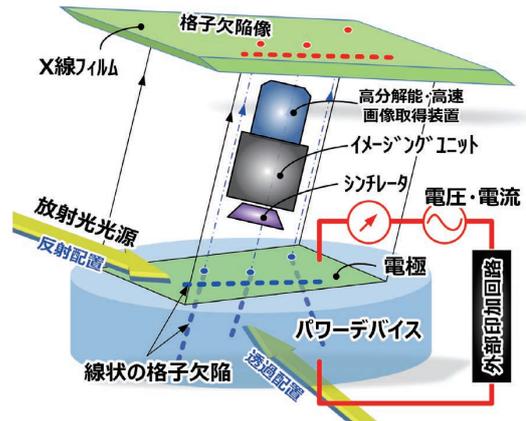


図2 β 型 Ga_2O_3 パワーデバイス格子欠陥のオペランド観測法の概略図

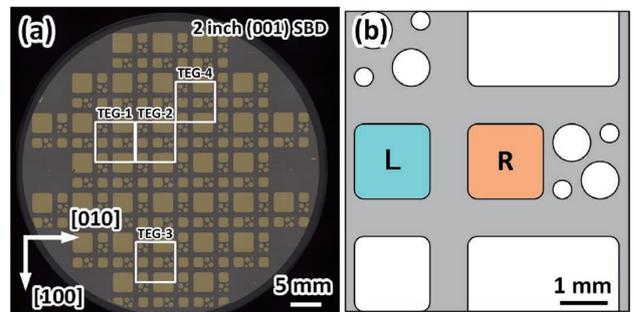


図3 (a) β 型 Ga_2O_3 パワーデバイス(ショットキーバリアダイオード、SBD)ウエハの光学顕微鏡像。(b) SBD素子電極パターンの模式図[4]。

SBDウエハの光学顕微鏡像を示す。SBDはTi/Auバックサイド電極、 n^+ 基板(厚さ $530\ \mu\text{m}$ 、 $n=4\times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$)に n^- エピ層(厚さ $12\ \mu\text{m}$ 、 $n=3\times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$)を成長させ、Ni/Au電極を用いて構成されている。基板とエピ層はそれぞれedge-defined film-fed growth (EFG法)およびハライド気相エピタキシー(HVPE法)で成長させた。ウエハは $6.5\ \text{mm}\times 6.5\ \text{mm}$ のテストエレメントグループ(TEG)に分割され、各TEGには複数の異なる電極面積を持つSBDが含まれている(図3(b))[4]。

X線トポグラフィー(XRT)を礎としたオペランド観察法の開発に取り組んだ。XRTとは、欠陥周囲に生じた結晶面の湾曲によるX線回折方向の乱れを利用し、欠陥をイメージングする方法である。放射光施設である高エネルギー加速器研究機構(KEK)のBL-14BおよびBL-3Cビームライン

で単色化したX線を使用し、XRT観察を実施した。反射配置では、主にエピ層内の転位を検出し、基板／エピ層界面および基板側の情報も得ることができる。図4に反射配置で撮影したSBDチップのXRT像を示す。

欠陥の増殖または構造変化を瞬時的に捉えるために、高分解能かつ高速で欠陥のX線トポグラフィ像を取得する必要がある。撮影面積、空間分解能、露光時間等複数の要素を総合的に勘案し、シンチレータ、イメージングユニット、および画像取得装置から構成される光学系を構築することで、最適な撮影方法を見出した。オペランド観察に用いた撮影システムの概略図を図5に示す[5]。実際の反射配置XRT撮影では、 $g=024$ 、 $g=\overline{10}05$ 、 $g=316$ の三種類の逆空間の格子ベクトルを採用することで、鮮明な転位像を得ると同時に、転位周囲の原子のズレを表すバーガースベクトルの解析も可能となった。

上述した光学系と回折条件を利用し、図3の2インチウエハからチップ化したSBDデバイスを対象に、オペランド観察を実施した。現状、欠陥像取得と電圧電流印加システムとの連動には至っていないが、それぞれ独立に取得したデータの時系列分析を行うことで、デバイス電圧・電流特性の劣化と欠陥構造の変化との関連を調べることが可能になった。

図6にリアルタイムで観察した通電中のデバイスにおける転位像を示す。1視野のサイズが $260\mu\text{m} \times 180\mu\text{m}$ である。赤い矢印でサンプル上の同一場所を示す。わずかながらも画面の左上から右下に伸びる斜めの転位線が右側に移動した現象を確認した。この現象は通電によるすべり現象であり、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の(001)面基板に基づいたSBDデバイスでは、[010]方向の転位線が低抵抗領域（即ち、電流が流れやすい通路）と推定できる。本研究で開発した手法をもとに、高温動作機能、600

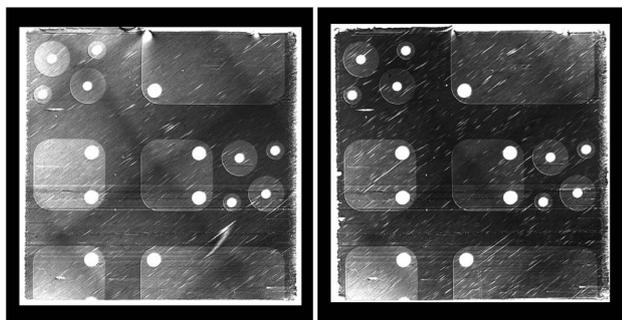


図4 SBDチップの反射配置XRT像の一例 (a) 通電前。(b) 通電後[1]。

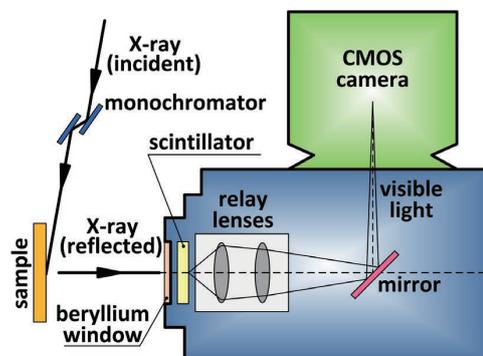


図5 オペランド観察に用いた撮影システムの概略図[5]。

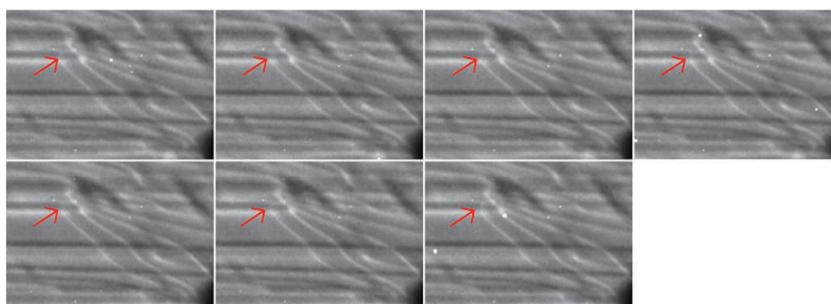


図6 リアルタイムで観察した通電中のデバイスにおける転位像。赤い矢印でサンプルの同一場所を示す。わずかながらも画面の左上から右下に伸びる斜めの転位線が右側に移動した現象を確認した。(260 $\mu\text{m} \times 180\mu\text{m}$ / 画像)

V以上の高電圧を印加する機能等を追加することで、手法のさらなる高度化を図り、今後、様々なデバイス破壊モードと既存欠陥および新規発生欠陥との相関を調べていく予定である。

Wakimoto, Hironobu Miyamoto, Akito Kuramata, Yukari Ishikawa, ISPlasma2024 (16th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials), Nagoya, Japan, Mar. 3-7, 2024

参考文献

- [1] M. Higashiwaki, AAPPS Bull., 32 (2022) 3.
- [2] H. Yamaguchi, A. Kuramata and T. Masui, Superlattice Microst., 99 (2016) 99.
- [3] O. Ueda, M. Kasu and H. Yamaguchi, Jpn. J. Appl. Phys., 61 (2022) 050101.
- [4] Y. Yao, D. Wakimoto, H. Miyamoto, K. Sasaki, A. Kuramata, K. Hirano, Y. Sugawara and Y. Ishikawa, Scr. Mater., 226 (2023) 115216.
- [5] Y. Yao, Y. Sugawara, Y. Ishikawa and K. Hirano, Jpn. J. Appl. Phys., 60 (2021) 010908.

2. 発表（研究成果の発表）

- (1) Y. Yao, K. Hirano, K. Sasaki, A. Kuramata, Y. Sugawara, and Y. Ishikawa, Lattice misorientation at domain boundaries in β -Ga₂O₃ single-crystal substrates observed via synchrotron radiation X-ray diffraction imaging and X-ray reticulography, J. Am. Ceram. Soc. 106, 5487 (2023). [DOI:10.1111/jace.19156]
- (2) Y. Yao, Y. Tsusaka, K. Hirano, K. Sasaki, A. Kuramata, Y. Sugawara, and Y. Ishikawa, Three-dimensional distribution and propagation of dislocations in β -Ga₂O₃ revealed by Borrmann effect X-ray topography, J. Appl. Phys. 134, 155104 (2023). [DOI:10.1063/5.0169526]
- (3) Y. Yao, Y. Sugawara, K. Sasaki, A. Kuramata, and Y. Ishikawa, Anisotropic mechanical properties of β -Ga₂O₃ single-crystal measured via angle-dependent nanoindentation using a Berkovich indenter, J. Appl. Phys. 134, 215106 (2023). [DOI:10.1063/5.0180389]
- (4) (招待講演) Yongzhao Yao, Kohei Sasaki, Daiki