

次世代パワー半導体・酸化ガリウム単結晶ウエファーの シンクロトロン X 線トポグラフィ観察

高治 広行, Sayleap Sdoeung, 嘉数 誠
佐賀大学大学院理工学研究科

近年、地球温暖化などを背景に、高効率で低損失なパワー半導体デバイスの開発が進められている。今日、利用されている多くの電気機器ではシリコン(Si)デバイスが用いられているが、シリコンの物性値によって決まるデバイスの性能は理論的な限界まで来ている。そこで、更なる高効率・低損失化のため次世代のパワー半導体デバイスとして酸化ガリウム(Ga_2O_3)が期待されている。しかし、酸化ガリウム半導体結晶中の欠陥はデバイスの漏れ電流の起源となるため、欠陥特性を明らかにする必要がある。そのため我々はシンクロトロン X 線トポグラフィを用いた結晶欠陥に関する研究を行っている。実験は九州シンクロトロン光研究センター(SAGA-LS)のビームライン BL09 で行った。垂直ブリッジマン(VB)法で育成した結晶のシンクロトロン X 線トポグラフィ観察を行ったところ、種結晶の直上では結晶軸が数度ずれたグレインが観察されたが、それ以外の広い領域で図 1 のように無転位領域が観察され、転位密度は 10cm^{-2} 未満と見積もられた。

謝辞 高品質 VB 結晶は信州大学干川圭吾名誉教授から提供いただいたものです。

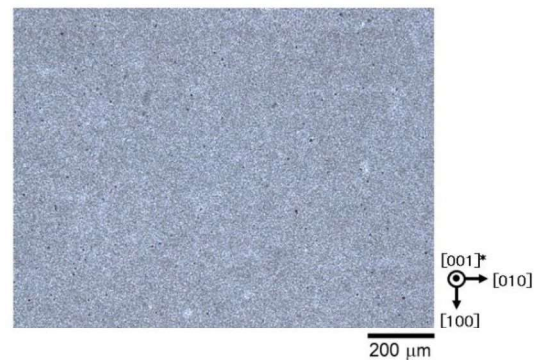


図 1. VB 結晶のシンクロトロン X 線トポグラフィ像。回折ベクトル $\mathbf{g}=224$ 。

次世代パワー半導体・酸化ガリウム単結晶ウエファーのシンクロトンX線トポグラフィー観察

高治 広行, Sayleap Sdoeung, 嘉数 誠
佐賀大学大学院理工学研究科

1. はじめに

β 型酸化ガリウム(β -Ga₂O₃)は、表1に示すようにSiやSiCに比べ高い禁制帯幅と絶縁破壊電界などの優れた電子物性をもつウルトラワイドギャップ半導体であり、高効率・低損失なパワー半導体を実現することができるとして期待されている。

しかし、酸化ガリウム半導体結晶中の欠陥はデバイスの漏れ電流の起源となるため、欠陥特性を明らかにする必要がある。そのため我々はシンクロトンX線トポグラフィーを用いた結晶欠陥に関する研究を行っている。

図1に β 型酸化ガリウムの結晶構造を示す。 β 型酸化ガリウムは単斜晶系構造をしており、[100]軸と[001]軸は垂直ではない。本実験では表面が(001)面の単結晶を用いており、[001]軸に垂直に切り出すことで(001)面を得ることができる。

表1. 主な半導体の物性値

Material	E_g (eV)	E_a (MV/cm)	μ (cm ² /Vs)	ϵ_r	v_{sat} ($\times 10^7$ cm/s)	λ (W/cmK)
Diamond	5.47	>10.0	~3800 (h)	5.7	1.05 (h)	22
Ga ₂ O ₃	4.8	8.0	~300 (e)	10	1.1 (e)	0.14
GaN	3.4	2.5	~2000 (e)	8.9	1-2.5 (e)	1.5
SiC	3.27	3.0	~900 (e)	9.7	2 (e)	4.9
GaAs	1.4	0.4	~8500 (e)	12.9	1-2 (e)	0.55
Si	1.1	0.5	~1400 (e)	11.7	1 (e)	1.3

Baliga 性能指数 (有能電力・損失) BFOM = $\epsilon_r \cdot \mu \cdot E_{Br}^3$ β -Ga₂O₃ ~ 3400 Si

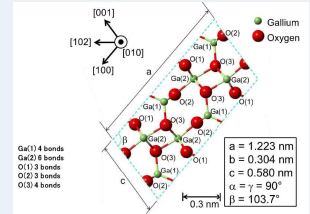


図1. β 型酸化ガリウムの結晶構造

2. シンクロトンX線トポグラフィーの概要

図2にシンクロトンの全景を示す。実験はビームラインBL09で行った。X線トポグラフィーは反射配置で撮像しており、X線は白色光で入射してきてモノクロメーターで回折させることで単色光へ変換している。単色光による観察は白色光による観察に比べ狭い視野の観察となり、測定時間も長くなるが、白色光による観察よりも歪みに敏感な観察ができるため結晶観察に適している測定方法である。

実験系のX線でもトポグラフィー像を撮像することはできるが、シンクロトンX線トポグラフィーは、①高輝度($10^9 \sim 10^{11}$ 光子/秒、実験室のX線源の $10^3 \sim 10^5$ 倍)、②X線光子エネルギーが変化可能で、回折条件を広く変えることができる、③平行度が高くコヒーレントであるため、試料から出た回折光もコヒーレントに見なすことができ、歪みの感度が増す、といった特徴を持つ。また、表2に広く使われている断面TEM観察との比較を示す。

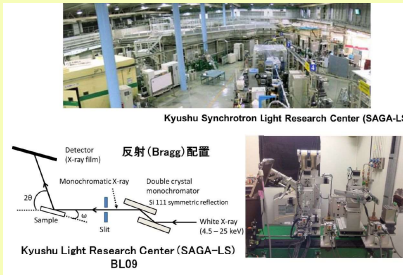


図2. シンクロトンX線トポグラフィー実験

- SAGA-LS光源概要
 - ・電子蓄積リング放出エネルギー: 1.4GeV
- ビームラインBL09
 - ・光子ビームピークエネルギー: 4keV
 - ・ビームサイズ: 100nm(H) × 15mm(W)

表2. X線トポグラフィーと断面TEM観察の比較

	X線トポグラフィー	断面TEM
ビームエネルギー	5 ~ 20 keV (peak: 5 keV)	100 ~ 1000 keV
分解能	$\Delta E/E < 10^{-3}$ (単色)	$\Delta E/E \sim 10^{-5}$
解像度	1 ~ 2 μ m	0.1 ~ 0.3 nm
ビームサイズ (試料面)	400mm(W) × 15mm(H) (白色) 130mm(W) × 8mm(H) (単色)	0.1 nm
試料配置	透過 (奥行方向全体) 反射 (表面近傍)	透過 (100nm程度)
試料準備	非破壊	破壊 (薄片化)
転位密度	$< 10^4$ cm ⁻²	$> 10^6$ cm ⁻²
g ベクトルによる転位のbベクトルの同定	可能	可能

3. シンクロトンX線トポグラフィー観察

EFG基板上にHVPE法によってエピ膜を育成した試料を用いてシンクロトンX線トポグラフィー観察を行った。本実験では、下地のEFG基板の欠陥とその上に成長したHVPEエピ膜との関係調べるために試料の同一箇所のEFG基板とHVPEエピ膜のX線トポグラフィー像を比較した。その結果を図3~5に示す。ここで、回折ベクトル $g = -1005$ ではX線の侵入深さは3.7 μ mであるため、HVPEエピ膜のトポグラフィー像では厚さ10 μ mのエピ膜のみを観察することとなる。

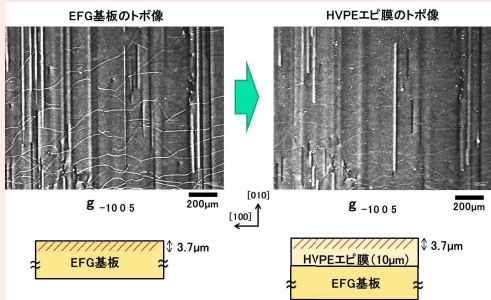


図3. 同一箇所のEFG基板とHVPEエピ膜の比較(1)

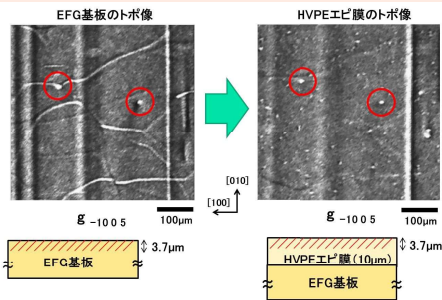


図4. 同一箇所のEFG基板とHVPEエピ膜の比較(2)

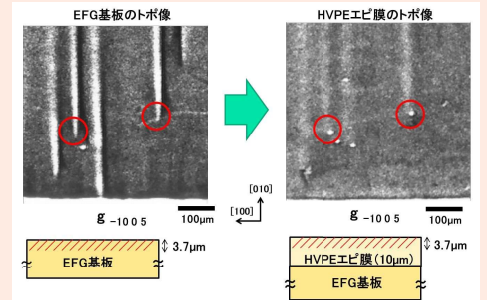


図5. 同一箇所のEFG基板とHVPEエピ膜の比較(3)

シンクロトンX線トポグラフィー観察によってEFG基板では貫通転位、ポイド、基底面転位が、HVPEエピ膜では貫通転位が観察された。これらの像を比較してEFG基板とHVPEエピ膜の転位の間には以下のような関係があるということがわかった。

- ・EFG基板の基底面転位はHVPEエピ膜には引き継がれない(図3)。
 - ・EFG基板の貫通転位はHVPEエピ膜に引き継がれている(図4)。
 - ・EFG基板の[010]方向に延伸するポイドの両端からHVPEエピ膜の貫通転位が観察された(図5)。
- これらの結果から、エピ膜の主な転位源となっているのは基板の貫通転位とポイド端であると考えられ、EFG基板とHVPEエピ膜の転位の関係は図6のような構造となっていると考えられる。

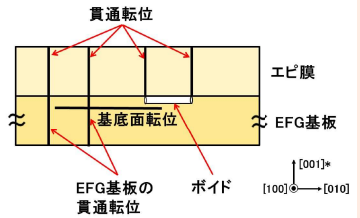


図6. EFG基板とHVPEエピ膜の転位の関係

4. まとめ

- ✓ EFG法によって育成された β 型酸化ガリウム単結晶のシンクロトンX線トポグラフィー観察を行った。
- ✓ X線トポグラフィーは反射配置で行い、X線は単色光を用いて観察を行った。
- ✓ EFG基板の基底面転位はHVPEエピ膜には引き継がれないが、貫通転位は引き継がれるという結果が得られた。
- ✓ EFG基板の[010]方向に延伸するポイドの両端からHVPEエピ膜の貫通転位が観察された。

参考文献

- [1] Satoshi Masuya, Kohei Sasaki, Akito Kuramata, Shigenobu Yamakoshi, Osamu Ueda, Makoto Kasu, Jpn. J. Appl. Phys. 58, 055501 (2019).
[2] 嘉数 誠, 日本結晶成長学会誌 Vol.44, No.4, 44-4-06, (2017).