

次世代パワー半導体・酸化ガリウム単結晶ウエファアの

シンクロトロン X 線トポグラフィー観察

氏名 SDOEUNG SAYLEAP, 高治 広行, Muhidul Islam Chaman, Che Amirul Syafiq Iqbal,
嘉数 誠

所属 佐賀大学大学院理工学研究科

省エネルギーのためには、電力使用機器における使用量の削減だけでなく、送配電における電力変換ロスの低減が重要である。電力変換を完全に無損失で行うことはできないため、パワーデバイスにて電力変換を行うたびに貴重な電力が失われている。そのため、パワーデバイスの損失低減が社会全体の省エネルギーのための重要な課題となっている。これまで、パワーデバイス用の半導体材料にはシリコン (Si) が用いられてきた、しかしながら、Si パワーデバイスはその材料物性に起因する性能限界に達しており、今後の大幅な消費電力低減は期待できない。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:Os) 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 線トポグラフィー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。EFG 法で育成した結晶基板上に 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ロン 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 エピ膜との関係を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 1 に示す。ここで、回折ベクトル $g=-1005$ では X 線の侵入深さは $3.7\mu\text{m}$ であるため、HVPE エピ膜のトポグラフィー像では厚さ $10\mu\text{m}$ のエピ膜のみを観察することとなる。

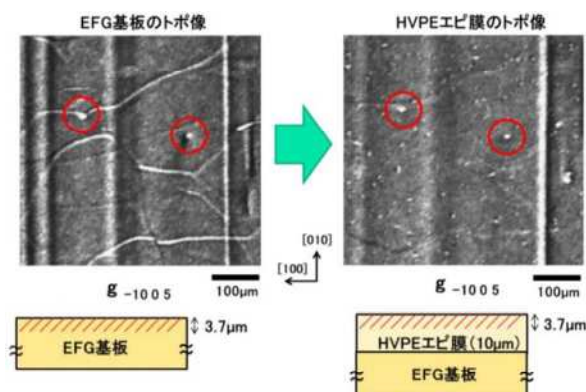


図 1. 同一箇所の EFG 基板と HVPE エピ膜の比較。

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tronX線トポグラフィー観察

Sayleap Sdoeng, 高治 広行, Muhidul Islam Chaman, Che Amirul Syafiq Iqbal, 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や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tronX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)	E _r	V _{br} (× 10 ⁷ cm/s)	A (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)	0.95
Si	1.1	0.5	~1400 (e)	11.7	1 (e)	1.3

β-Ga₂O₃ ~ 3400
Si

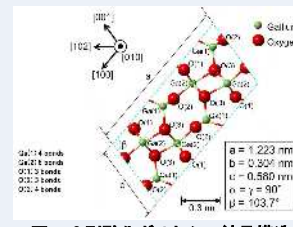


図1. β 型酸化ガリウムの結晶構造

2. シンクロtronX線トポグラフィーの概要

図2にシンクロtron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tronX線トポグラフィーは、①高輝度(10⁹~10¹¹光子/秒、実験室のX線源の10³~10⁶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平行度がよ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出すことができ、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tronX線トポグラフィー実験

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 (max: 5 keV)	100 ~ 1000 keV
分辯率	$\Delta E/E < 10^{-3}$ (単色)	$\Delta E/E \sim 10^{-1}$
撮像度	1 ~ 2 μ m	0.1 ~ 0.3 nm
ビームサイズ (試料面)	400nm(0) x 100nm(0) (白色)	0.1 nm
試料厚さ	透過(直行方向全体)	透過(100nm程度)
試料準備	非破壊	破壊(薄片化)
撮像速度	< 10 ⁴ sec ²	> 10 ⁶ sec ²
歪みによる回折ベクトルの可視化	可能	可能

- 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) x 15mm(W)

3. シンクロtronX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tronX線トポグラフィー観察を行った。本実験では、下地のEFG基板の欠陥とそこに成長したHVPEエピ膜との関係を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。

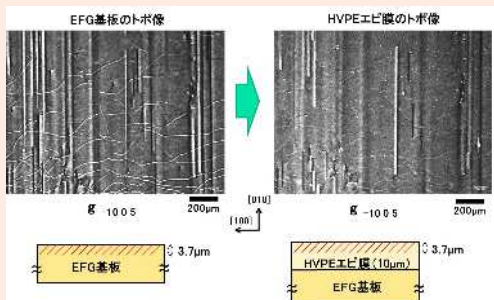


図3. 同一箇所のEFG基板とHVPEエピ膜の比較(1)

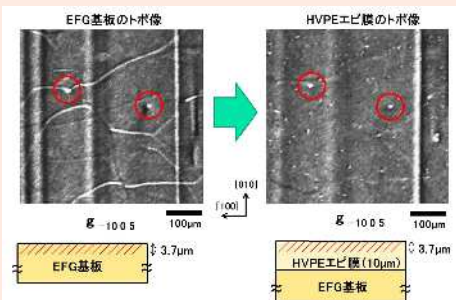


図4. 同一箇所のEFG基板とHVPEエピ膜の比較(2)

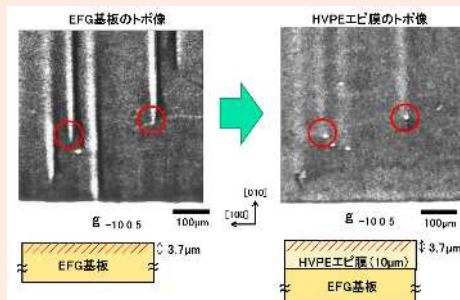


図5. 同一箇所のEFG基板とHVPEエピ膜の比較(3)

シンクロtronX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。

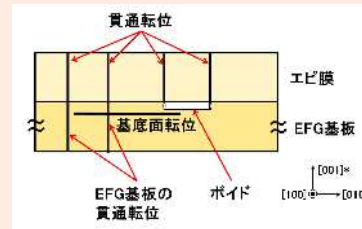


図6. EFG基板とHVPEエピ膜の転位の関係

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tronX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).