

パワー半導体ダイヤモンド単結晶の欠陥の シンクロトロン X 線トポグラフィ観察

植松卓巳、榊谷聡士、森林朋也、花田賢志、嘉数 誠

佐賀大学大学院工学系研究科、グリーンエレクトロニクス研究所

ダイヤモンドはバンドギャップ 5.47eV を持つワイドギャップ半導体である。高破壊電界 (10MV/cm 以上)、高キャリア移動度 (電子 4500cm²/V/s, 正孔 3800cm²/V/s) と優れた物性値を示すため、次世代パワー半導体材料として期待されている。しかし結晶欠陥は素子でリーク電流の発生、耐圧の低下につながることで予想され、シンクロトロン光を用いた X 線トポグラフィでダイヤモンド単結晶の欠陥の観察を行い、種類の特異、生成機構の解明を行っている。

観察試料は、高温高圧 (HPHT) 合成 IIa 型ダイヤモンド単結晶である [1]。X 線トポグラフィ観察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 BL09A で行った。入射 X 線は平行配置した Si 単結晶の分光器で単色化した後、ラウエ配置に設置した試料で回折させ、透過像を撮影した。

X 線回折条件 (\mathbf{g} ベクトル) が、転位のバーガーズベクトル (\mathbf{b}) と $\mathbf{g} \cdot \mathbf{b} = 0$ の関係を持つとき、像のコントラストが消失する原理を用い、様々な \mathbf{g} ベクトルで観察を行い、ダイヤモンドの種類を特定した [2]。

ダイヤモンド単結晶を提供いただいた住友電工の角谷均博士に感謝いたします。

[1] H. Sumiya, K. Tamasaku, Jpn. Appl. Phys. 51 (2012) 090102.

[2] M. Kasu, R. Murakami, S. Masuya, H. Sumiya, Appl. Phys. Exp. 7 (2014) 125501.

パワー半導体ダイヤモンド単結晶の欠陥のシンクロトロンX線トポグラフィー観察

Synchrotron X-ray Topography Observation of Defects in Power Semiconductor Diamond Single Crystal



○植松 卓巳、榎谷 聡士、森田 朋也、花田 賢志、嘉数 誠
佐賀大学大学院工学系研究科、佐賀大学グリーンエレクトロニクス研究所
○T. Uematsu, S. Masuya, T. Moribayashi, K. Hanada, M. Kasu

Department of Electrical and Electronic Engineering, Green Electronics Laboratories, Saga University

1. はじめに

ダイヤモンドは5.47eVのワイドギャップを持つワイドギャップ半導体である。高い絶縁破壊電界 (10MV/cm以上)、高いキャリア移動度 (電子4500cm²/V/s 正孔3800cm²/V/s) と優れた物性値を有するため、次世代パワー半導体材料として期待されている。しかし結晶欠陥は素子でのリーク電流の発生、耐圧の低下につながるため、我々はシンクロトロン光を用いたX線トポグラフィーでダイヤモンド単結晶の欠陥の生成機構の解明の研究を行っている。

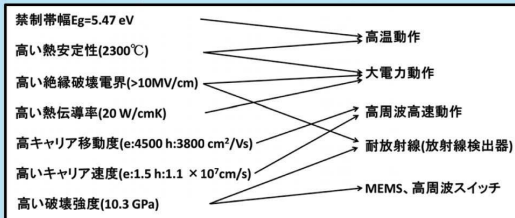
2. ダイヤモンドの特徴

表1で示すようにダイヤモンドは他の半導体材料より優れた物性値を示し、デバイスとして用いた場合、表2のような応用の可能性がある。

表1: 半導体材料の物性値と電力デバイス性能 及び高周波電力デバイス性能

| 材料 | 禁制帯幅 E _g (eV) | 絶縁破壊電界 E _{BR} (MV/cm) | 飽和速度 v _{sat} (×10 ⁷ cm/s) | 移動度 μ (cm ² /Vs) | 比誘電率 ε _r | 熱伝導率 λ (W/cmK) | 性能指数 BFOM | 性能指数 JFOM |
|---------|-----------------------------|-----------------------------------|--|--------------------------------|------------------------|-------------------|--------------|--------------|
| Diamond | 5.47 | >10 | 1.5 (e) 1.1 (h) | ~4500 (e) ~3800 (h) | 5.7 | 22 | 50000 (h) | 1340 (h) |
| GaN | 3.42 | 3 | 2.4 (e) | ~2000 (e) | 8.9 | 1.5 | 1100 | 580 |
| SiC | 3.26 | 2.8 | 2.2 (e) | ~1000 (e) | 9.7 | 4.9 | 490 | 420 |
| Si | 1.12 | 0.3 | 1.0 (e) | ~1350 (e) | 11.9 | 1.5 | 1 | 1 |

表2: ダイヤモンドの特徴と応用の可能性



3. X線トポグラフィー観察法

X線トポグラフィー観察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BL09Aで行った。本実験で用いたX線トポグラフィー装置の構成図を図1に示す。

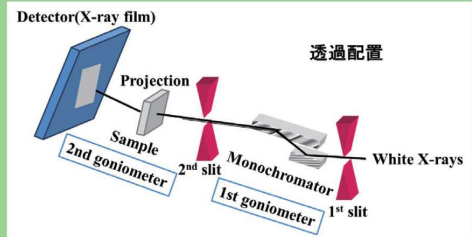


図1: X線トポグラフィー装置の構成図

OSAGA-LS光源

- 電子蓄積リング放出エネルギー 1.4 GeV
- ビームラインBL09A
- 光子ビームピークエネルギー 4 keV
- ビームサイズ 100 mm(H)× 15 mm(V)

4. 単色X線トポグラフィー観察

高温高压合成(HPHT)ダイヤモンド単結晶(寸法5.3×5.4×0.7 [mm], 面方位(001))を様々なgベクトルで単色X線トポグラフィー観察を行い、転位の種類を同定した。

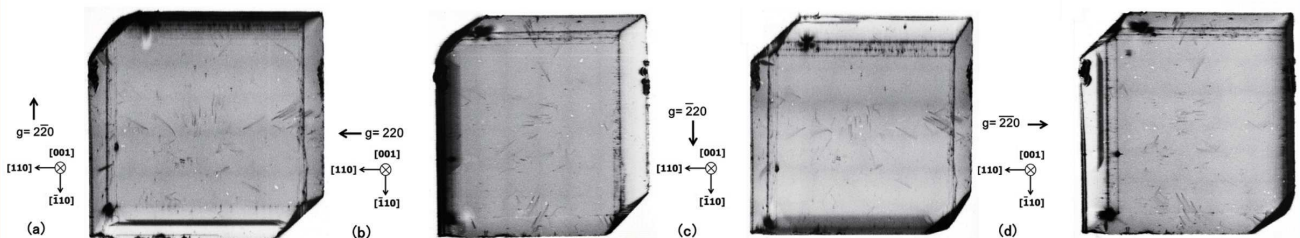


図2: HPHTダイヤモンド(001)の様々なgベクトルにおけるX線トポグラフィ像 (a) g = 220, (b) g = 220, (c) g = 220, (d) g = 220

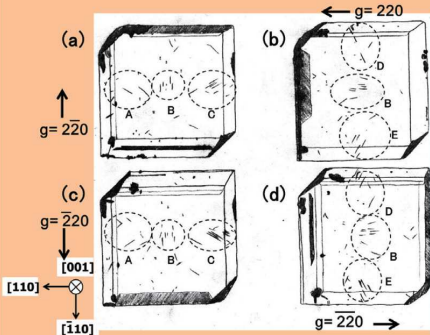


図3: HPHTダイヤモンド(001)のスケッチ像

転位のバーガーズベクトルと回折gベクトルの関係が $b \cdot g = 0$ の場合、転位は出現し、 $b \cdot g \neq 0$ の場合、転位は消滅するので、この原理を用いてバーガーズベクトルを同定することができる。

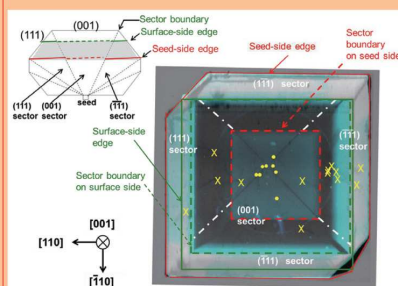


図4: HPHTダイヤモンド(001)のフォトルミネッセンス像とX線トポグラフィ像の重ね合わせ図

フォトルミネッセンス画像の青い光は窒素不純物に由来し、(001)、(110)、(111)成長セクターを判別できる。

表3: HPHTダイヤモンド(001)に含まれる転位の同定結果

| Group | g | Image contrast | b | Growth sector | t | Dislocation type |
|-------|-----|----------------|---------------------|---------------|---|------------------|
| A | 220 | visible | $\frac{a}{2} [110]$ | (111) | $\begin{pmatrix} 111 \\ -[331] \end{pmatrix}$ | edge |
| | 220 | invisible | | | | |
| | 220 | visible | | | | |
| | 220 | invisible | | | | |
| B | 220 | invisible | $\frac{a}{2} [110]$ | (001) | $\begin{pmatrix} 001 \\ [001] \end{pmatrix}$ | edge |
| | 220 | visible | | | | |
| | 220 | visible | | | | |
| | 220 | invisible | | | | |
| C | 220 | visible | $\frac{a}{2} [110]$ | (111) | $\begin{pmatrix} 111 \\ -[331] \end{pmatrix}$ | edge |
| | 220 | invisible | | | | |
| | 220 | visible | | | | |
| | 220 | invisible | | | | |
| D | 220 | visible | $\frac{a}{2} [110]$ | (111) | $\begin{pmatrix} 111 \\ -[331] \end{pmatrix}$ | edge |
| | 220 | invisible | | | | |
| | 220 | visible | | | | |
| | 220 | invisible | | | | |
| E | 220 | invisible | $\frac{a}{2} [110]$ | (111) | $\begin{pmatrix} 111 \\ -[331] \end{pmatrix}$ | edge |
| | 220 | visible | | | | |
| | 220 | invisible | | | | |
| | 220 | visible | | | | |

バーガーズベクトルbと転位ベクトルtの方向が垂直なら刃状転位、平行なら螺旋転位、それ以外なら混合転位と同定できる。この方法から、(111)成長セクターの転位は刃状転位となり(001)成長セクターの転位は刃状転位と混合転位ということが明らかになった。

5. 結論

- ✓ HPHTダイヤモンドの(111)成長セクターの転位は刃状転位である。
- ✓ HPHTダイヤモンドの(001)成長セクターの転位は刃状転位と混合転位である。

6. 謝辞

本研究でご指導いただいたSAGA-LSの石地耕太郎博士、川戸清爾博士、住友電工の角谷均博士に感謝申し上げます。本研究の一部は、科研費による成果です。

7. 参考文献

- [1] H.Sumiya and K.Tamasaku, JJAP 51 (2012) 090102.
- [2] K.Tamasaku, et.al., J. Phys D 38 (2005) A61.
- [3] M.Kasu, R.Murakami, S.Masuya, and H.Sumiya, Applied Physics Express 7(2014)125501