

パワー半導体結晶のシンクロトロン X 線トポグラフィーによる研究

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

電力エネルギーでは、再生可能エネルギーによる発電に注目が集まるが、発電から需要家への送電・配電における様々な電力変換の効率の向上が重要な社会課題となっている。現在はその電力変換にシリコン半導体の電子素子が用いられているが、その効率はシリコン半導体の物性で決まる理論限界にほぼ到達してしまった(図1)。しかしシリコンよりバンドギャップ(EG)の広い半導体の電子素子は、格段に高効率にできることがわかっており、パワー半導体とも呼ばれている(表1)。その中で、SiCやGaNは研究開発が盛んに行われるようになった。

それに対し、我々は究極の物性をもつダイヤモンドのパワー素子の開発を進めている[1]。ダイヤモンドは非常に広いバンドギャップを持ち、破壊電界強度や熱伝導率は最高で、キャリア移動度も高く、非常に優れた物性をもっている。

しかしダイヤモンド半導体結晶中の欠陥は電子素子の特性を劣化させるため、欠陥特性や生成機構を明らかにし、密度の低減のために、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欠陥の研究も行っている[2]。

図2は高温高圧(HPHT)合成IIa型ダイヤモンド単結晶の X 線トポグラフィ像である。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。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。観察は、様々な X 線回折条件(\mathbf{g} ベクトル)で行い、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という物理を利用し、結晶のバーガーズベクトルを同定した。図3はセクショントポグラフィ像で、スリットを狭め、試料を平行移動させることで、断面像を取る手法である。これを応用すると三次元像も得られる。

精力的に研究を遂行する博士後期課程の榎谷聡士君といつもご指導いただき SAGA-LS の石地耕太郎氏に心より感謝申し上げます。

[1] 嘉数 誠、日本結晶成長学会 2012 年、39 巻、4 号、158 頁。

[2] 嘉数 誠、日本結晶成長学会 2012 年、39 巻、4 号、190 頁。

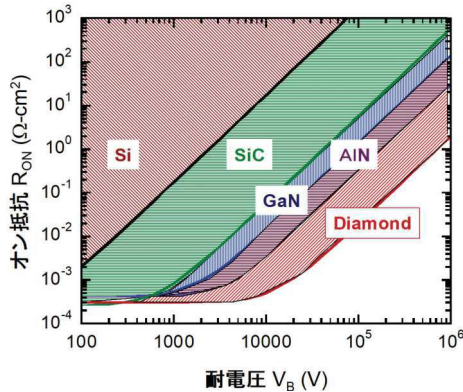


図1. 半導体の効率の理論限界、ダイヤモンドと他半導体の比較

Material	E_g (eV)	E_{FR} (MV/cm)	v_{sat} ($\times 10^7$ cm/s)	μ (cm^2/Vs)	ϵ_r	λ (W/cmK)
Diamond	5.47	>10	1.5 (e) 1.05 (h)	~ 4500 (e) ~ 3800 (h)	5.7	22
Ga_2O_3	4.8	8	—	~ 300 (e)	10	0.14
SiC	3.27	3.0	2 (e)	~ 900 (e) ~ 120 (h)	9.7	4.9
GaN	3.4	2.5	1-2.5 (e)	~ 2000 (e)	8.9	1.5
GaAs	1.4	0.4	1-2 (e)	~ 8500 (e) ~ 400 (h)	12.9	0.55
Si	1.1	0.3	1 (e)	~ 1400 (e) ~ 450 (h)	11.7	1.3

表1. 半導体の物性値、ダイヤモンドと他半導体の比較

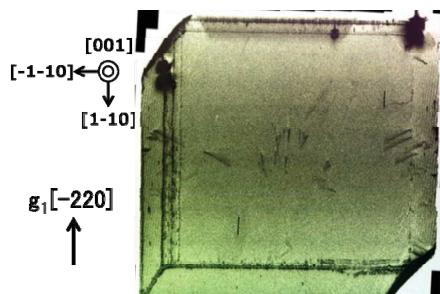


図2. 高品質ダイヤモンド結晶の X 線トポグラフィの透過像

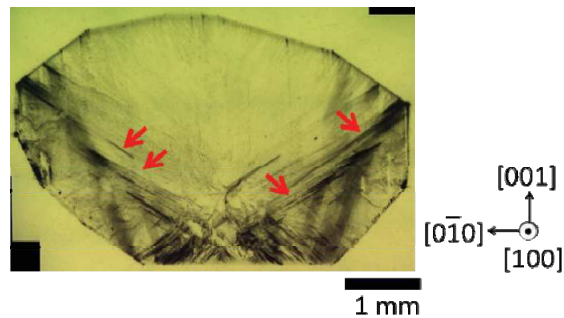


図3. 高品質ダイヤモンド結晶の X 線トポグラフィのセクション像



次世代パワー半導体結晶の シンクロtronX線トポグラフィーによる観察

嘉数 誠、榎谷聡士

佐賀大学グリーンエレクトロニクス研究所
佐賀大学大学院 工学系研究科



高圧送電



新幹線



無停電電源(UPS)



EV・HEV車

なぜダイヤモンドがパワー素子で重要か

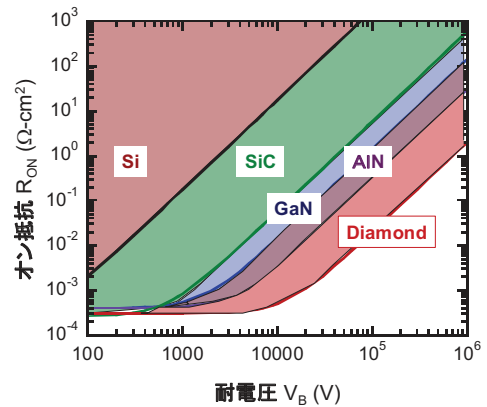
ダイヤは最高の絶縁破壊電界、熱伝導率、高い飽和速度をもち、最高性能の高周波電力デバイスを実現可能にする

材料	禁制帯幅 Material E_G (eV)	絶縁破壊電界 E_{BR} (MV/cm)	飽和速度 v_{sat} ($\times 10^7$ 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 JFOM
Diamond	5.47	>10	1.5 (e) 1.1 (h)	~ 4500 (e) ~ 3800 (h)	5.7	22	1340 (h)
GaN	3.42	3	2.4 (e)	~ 2000 (e)	8.9	1.5	580
SiC	3.26	2.8	2.2 (e)	~ 1000 (e)	9.7	4.9	420
Si	1.12	0.3	1.0 (e)	~ 1350 (e)	11.9	1.5	1

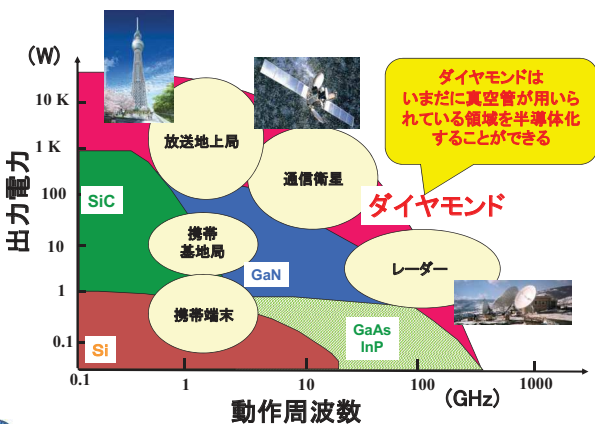
Johnson デバイス性能指数 (高周波電力性能)

$$JFOM = \left(\frac{E_{BR} \cdot v_{sat}}{2\pi} \right)^2 \quad \frac{Diamond}{GaN} \approx 2.3$$

半導体の電力と損失の関係



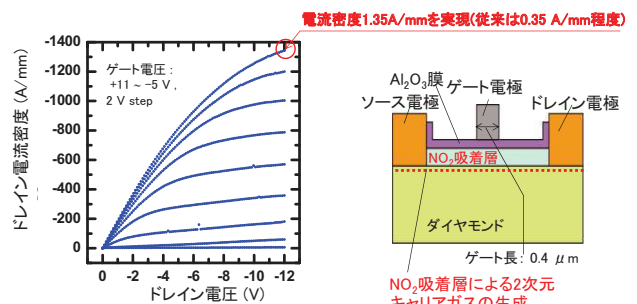
ダイヤに期待される高周波パワー応用



嘉数, NTT技術ジャーナル 2004年6月

ダイヤモンドMOSFETのDC特性

NO₂吸着層により高濃度な2次元キャリアガスを形成し、従来より大幅に大きな電流密度を実現



ダイヤモンド素子の電流-電圧特性と断面模式図

K.Hirama, H.Sato, Y.Harada, H.Yamamoto, and M. Kasu, Jpn. J. Appl. Phys. 51 (2012) 090112

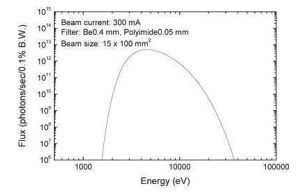
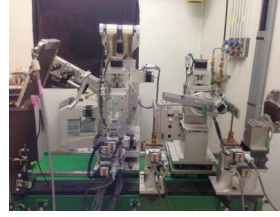
発表内容

- ✓なぜダイヤモンド・パワー半導体か？
- ✓ダイヤモンド結晶の欠陥のX線トポグラフィー観察
- ✓ダイヤモンド結晶のセクション(三次元)トポグラフィー
- ✓KTN結晶の相変化・欠陥生成のリアルタイム観察

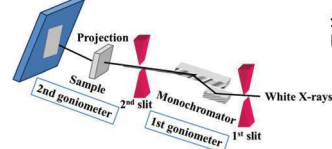
7

実験方法

九州シンクロtron光研究センター-BL09Aのシンクロtron放射光



Detector(X-ray film)

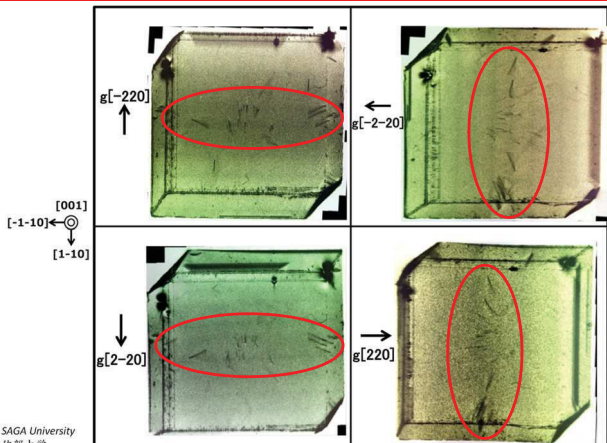


最大光子エネルギー 4 keV
ビームサイズ 100 mm(幅)×15 mm(高さ)



7

(220)等価回折面の比較



13

まとめ

- ✓次世代のパワー半導体の、高品質ダイヤモンド結晶のX線トポグラフィーを、様々な回折条件で行い、 $b \cdot g = 0$ の条件でコントラストが消滅する原理(消滅則)を用いて欠陥の特性を同定した。
- ✓高品質ダイヤモンド結晶のセクショントポグラフィー観察を行い、三次元画像を得られるようになった。その結果から、欠陥の構造を立体的に解析できるようになった。

謝辞

日頃、ご指導いただく九州シンクロtron光研究センターの石地耕太郎博士をはじめ皆様に感謝申し上げます。