

パワー半導体応用を目指した CVD ダイヤモンドエピ膜の シンクロトロン X 線トポグラフィー観察

嘉数 誠、榎谷聡士
佐賀大学大学院工学系研究科

ダイヤモンドは禁制帯幅5.47eVのワイドギャップ半導体であり、次世代のパワー半導体として期待されている。結晶中の格子欠陥はデバイス特性に影響を与えることが予想されるが、格子欠陥の構造や生成機構は明らかではない。そのため我々はSAGA-LSでシンクロトロン光を用いたX線トポグラフィーで、高温高压合成(HPHT)ダイヤモンド基板とその上にCVD成長したホモエピ膜の両者を観察、比較し、欠陥の発生機構を調べた。観察試料は(001)HPHT単結晶上にマイクロ波プラズマCVDで50 μm ホモエピ成長した試料である。X線トポグラフィーは表面に敏感な反射Bragg配置で行った。[1]

転位が観察された箇所を○で示している。基板の転位は、ホモエピ膜でも引き継がれているが、エピ膜で発生している転位も観察される。なお、エピ膜の転位を $\mathbf{g} \cdot \mathbf{b}$ 積の消滅則により解析した結果、主に混合転位であることがわかった。

本研究は九州シンクロトロン光研究センターの支援により行われました。

[1]S. Masuya, M. Kasu, Jpn. J. Appl. Phys. 55 (2016) 04030.

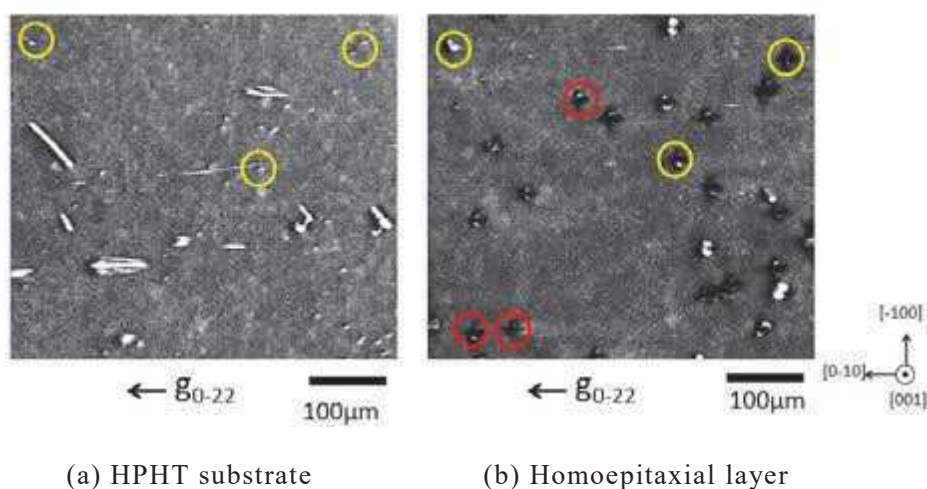


Fig. 1 X-ray topography images of (a) HPHT substrate and (b) homoepitaxial film at the same position



パワー半導体応用を目指したCVDダイヤモンドエピ膜のシンクロtronX線トポグラフィ観察

嘉数 誠、榎谷 聡士

佐賀大学大学院工学系研究科電気電子工学専攻、グリーンエレクトロニクス研究所

Email: kasu@cc.saga-u.ac.jp

1. はじめに

Material	Band gap E_g (eV)	Breakdown field E_{br} (MV/cm)	Mobility μ (cm ² /Vs)	Saturation current J_{sat} [A/cm ²]	Relative dielectric constant ϵ_r	Thermal conductivity κ [W/mK]	RFOM [D]	BFOM [D]
Diamond	5.47	>10	4300 (n) 3800 (p)	1.5 (n) 1.1 (p)	5.7	22	1348	10000
GaN	3.42	3	2000	2.4	9.9	1.5	580	1100
SiC	3.26	2.8	1000	2.2	9.7	4.8	420	490
Si	1.12	0.3	1300	1.0	11.9	1.5	1	1

RFOM: μ/ν 力性能指数(高効率・電力性能) $RFOM = \epsilon_r \cdot \mu \cdot E_{br}^3$
BFOM: ジオンゾン性能指数(高周波電力性能) $BFOM = \left(\frac{E_{br}}{2H}\right)^3$



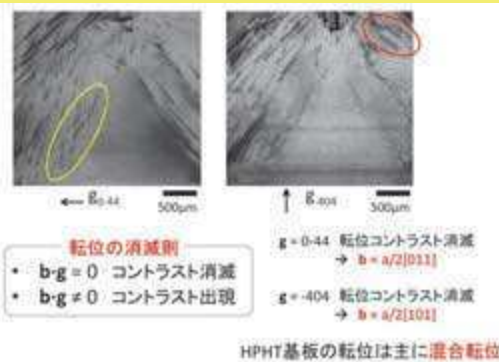
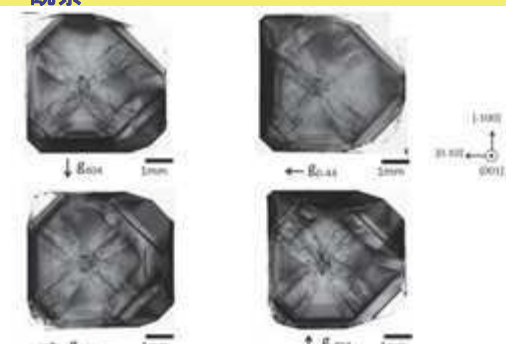
ダイヤモンド半導体は、バンドギャップ(E_g)が最も高く、高効率電力性能を示すバリーガ性能指数でも、高周波電力性能を示すジオンゾン性能指数でも、半導体の中で最も高い値を示し、高いパワー半導体デバイス性能が予想されます[1]。

現在、SiCは大電力制御に、GaNは携帯基地局への応用を目指していますが、ダイヤモンド半導体は、放送地上局、通信衛星、レーダーなどで、進行波管(TWT)に代わる、高周波電力用のパワー半導体デバイスとして期待されます[1]。

実験は、九州シンクロtron光研究センターのビームラインBL09のX線トポグラフィ装置を用いて行いました。シンクロtron光をSi(111)からなる分光器で単色化した高輝度で高コヒーレントのX線を光源とし、試料を反射(Bragg)配置に設置し、回折像をX線フィルムで撮像しました[2,3]。

2. HPHTダイヤ基板のX線トポグラフィ観察

- HPHT基板のシンクロtronX線トポ観察
 - HPHT(001)単結晶、 $4 \times 4 \times 0.5$ mm³
 - 基板中の欠陥の観察
- 基板にマイクロ波プラズマCVD法によりホモエピ成長
 - マイクロ波: 750W, CH₄/H₂: 1%, 反応圧力: 50Torr
 - エピ厚: 50 μ m
 - エピ成長後、表面を機械研磨で平坦化
- CVDエピ膜のシンクロtronX線トポ観察

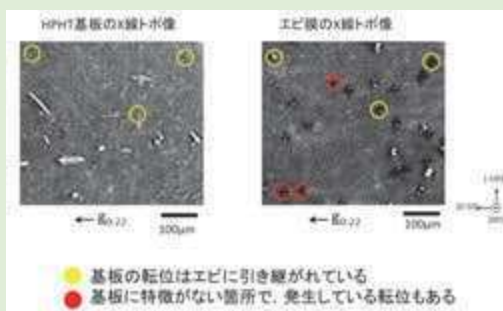
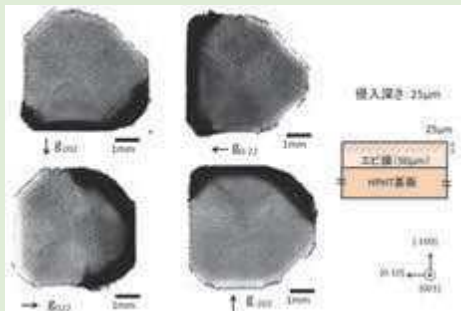


実験では、まず高温高压合成(HPHT)ダイヤモンド単結晶のX線トポ観察を行い、つぎにCVDにより成長したホモエピタキシャル膜のX線トポ観察を行い、両者の像を比較することで、転位や積層欠陥などの欠陥をHPHT結晶に由来するものとCVDエピ膜に由来するものに区別することができました[2,3]。

まず、(001)面のHPHTダイヤモンド基板のX線トポグラフィ像を取りました。中心付近の種結晶から表面に垂直な[001]方向に延伸する転位と4つの等価な[11-2]方向に延伸する転位を観察しました[2,3]。

HPHT基板の同じ場所を、異なる回折ベクトル(g)で撮像した像を比較します。黄色の転位は $g=0-44$ ではコントラストが消滅しており、赤の転位は $g=0-44$ で消滅しています。X線回折では、 $b \cdot g = 0$ の場合に、コントラストが消滅するため、その現象を用いた解析を行うことで、前者の転位はバーガーズベクトル、 $b = a/2[101]$ で、後者は $b = a/2[011]$ であることがわかりました。また両者の転位とも延伸方向が[001]なので、混合転位であることもわかりました。

3. CVDダイヤエピ膜のX線トポグラフィ観察



つぎに同じHPHT基板上にエピタキシャル成長したCVDホモエピタキシャル膜のX線トポグラフィを観察しました[3]。X線の試料結晶への侵入長は約25 μ mで、エピタキシャル膜厚の50 μ mより薄いことから、この像はCVDホモエピタキシャル膜からの回折像ということが判断できます。

CVDホモエピタキシャル膜のX線トポグラフィでは、黄色で示す成長丘の転位が、 $g=202$ でコントラストが消滅しました。このことから $b = a/2[101]$ と同定できました。また延伸方向が[001]なので、混合転位と分類できました。また、1つの成長丘中の転位がペアになっているという特徴も明らかになりました。

同一箇所でのHPHT基板とエピ膜のX線トポ像を比較しました。基板の黄色で示した転位は、エピ膜でも見られ、エピ膜に引き継がれていることがわかりました。赤は基板には観察されず、エピ膜のみで観察されるので、基板・エピ膜界面で発生し、エピ膜中を延伸する転位であることがわかりました[4]。

4. 結論

- HPHT基板結晶とCVDホモエピ後の結晶をシンクロtronX線トポグラフィで観察し、比較することでCVDホモエピの欠陥を調べました。
- $b \cdot g$ 消滅則を用いた解析からCVDホモエピ中の転位は、主に $b = a/2[101]$ の混合転位であることを明らかにしました。
- エピ表面に生成した成長丘には、2本のペアの転位が生成する傾向があることがわかりました。
- CVDエピ膜の転位は、基板結晶から引き継がれているものと基板・エピ膜界面で生成し、エピ膜中を延伸する転位があることがわかりました。

References

[1] M. Kasu, "Diamond field-effect transistors for RF power electronics: Novel NO₂ hole doping and low-temperature deposited Al₂O₃ passivation", Jpn. J. Appl. Phys. 56, 01AA01 (2017). [2] M. Kasu, et al., "Synchrotron X-ray topography of dislocations in high-pressure high-temperature-grown single-crystal diamond with low dislocation density", Appl. Phys. Express 7, 125501 (2014). [3] M. Kasu, "Diamond epitaxy: basics and applications", Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials 62, 317 (2016). [4] S. Masuya, et al., "Determination of the type of stacking faults in single-crystal high-purity diamond with a low dislocation density of <math>< 50 \text{ cm}^{-2}</math> by synchrotron X-ray topography", Jpn. J. Appl. Phys. 55, 040303 (2016).

謝辞

貴重な助言を頂いた石地耕太郎博士(SAGA-LS)に感謝いたします。本実験は九州シンクロtron光研究センター(SAGA-LS)で行われました。本研究は科研費(15H03977)の助成により行われました。