

パワーデバイス用低抵抗ダイヤモンドの欠陥評価

鹿田真一、亀井栄一、山口浩司、明石直也

関西学院大学 理工学部

1. はじめに

SiC を用いたパワー半導体デバイスが、Si に代わり各種機器に使われ始めているが、最近では鉄道車両の駆動に導入されて、電力回生の機会の多い普通電車で50%にも及ぶ大きな省エネ効果が確認されている。こうした状況を受け、次世代新幹線車両への適応も検討されている^[1]。そうした状況を受け、さらなるワイドギャップ半導体に注目が集まっており、絶縁破壊電界 21.5 MV/cm^2 など SiC のさらに7倍程度の究極物性を有するダイヤモンドも大きく期待されている^[3,4]。

ダイヤモンドは通常 $10^{13} \text{ } \Omega\text{cm}$ 以上の高絶縁材料であるが、高出力パワー半導体としては $1 \text{ m}\Omega\text{cm}$ の低抵抗ウェハが必須であり、ドーピングにより16桁の低抵抗を実現せねばならない。現在、高温高压 (HPHT) による基板が極少量入手できる程度の段階であり、欠陥研究などは未着手の状況にある^[5]。今回、九州シンクロtron光研究センターの放射光^[6]を用いて X 線トポグラフィー計測を行い、低抵抗ダイヤモンドの欠陥解析を試みたので、ここに報告する。

2. 実験

2-1 試料

(1) 試料調製

試料には、HPHT 合成による市販の低抵抗 p+ダイヤモンド種結晶を用いた。結晶サイズは 3 mm 角である。P 型ドーパントはアクセプタ準位 0.37 eV の B を用いたものである。ドーピング濃度は 300 ppm であり、ホール測定を実施したところ $9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ であった。表面の段差による妨害反射をなくすため、表面はファイン研磨を施した。

2-2 実験方法

X 線トポグラフィー像撮影は、九州シンクロtron光研究センターのビームライン BL09 の単色光を用いて行った。計測のモードは透過及び反射であり、各々

逆格子ベクトルとして透過モードでは $\langle 220 \rangle$ 、反射モードでは $\langle 202 \rangle$, $\langle 404 \rangle$, $\langle 113 \rangle$ などを用いた。用いた放射光のエネルギーは 6.7 から 11.7 keV であった。図1に透過測定モードの場合の X 線トポグラフィーの計測模式図を、図2に反射モードの X 線トポグラフィーの計測系の写真を示す。像は、写真フィルムで撮影し、写真現像を行った。

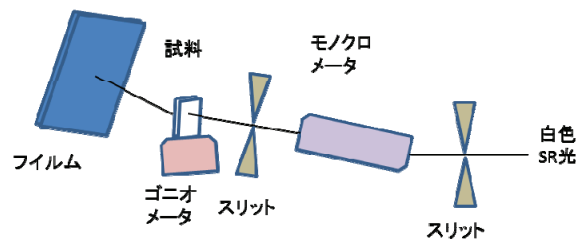


図1 X 線トポグラフィーの計測模式図

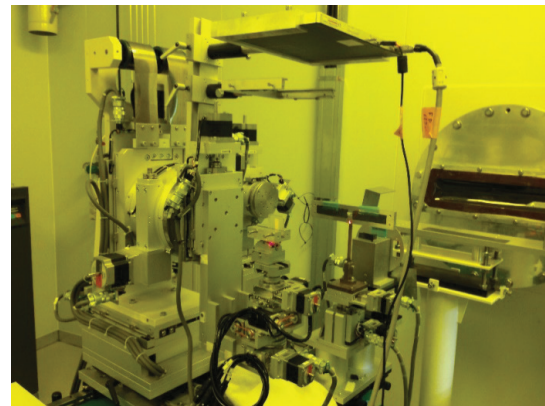


図2 BL09における X 線トポグラフィーの計測系の写真

3. 結果及び考察

g ベクトル $[202]$ を用いて撮影した低抵抗 p+ダイヤモンド種結晶の X 線トポグラフィー像を図3に示す。まず中央部に大きく×状に黒い太い筋が観察される。これは HPHT 法によるダイヤモンドの成長様式に関連している。図4に示すように、HPHT によるダイヤモンドは $\langle 111 \rangle$ 方向に成長するため、4つの成長セクターを有する。HPHT 結晶の外観は、図5に示

すような形状になり、これをスライスして、(001)面の単結晶基板を得る。中央部に大きく×状に黒い太い筋に見えるのは、この成長セクターの境界領域である。中央の四角は[001]、囲む4つは<111>であり、右から時計回りに順に[111], [1-11], [-1-11], [-111]である。絶縁結晶ではこれら成長セクターはX線トポグラフィーでは観測されないで、原料中にP型ドーパントのBを含むp+HPHT結晶特有のものである。

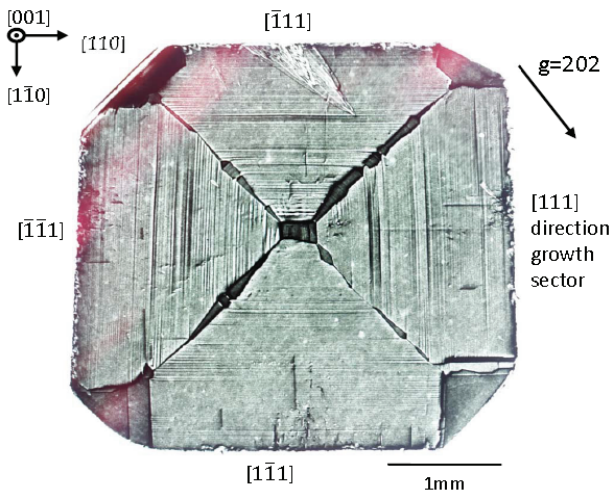


図3 p+HPHT種結晶のX線トポグラフィー像の一例 (gベクトル<202>) ([8]より引用)

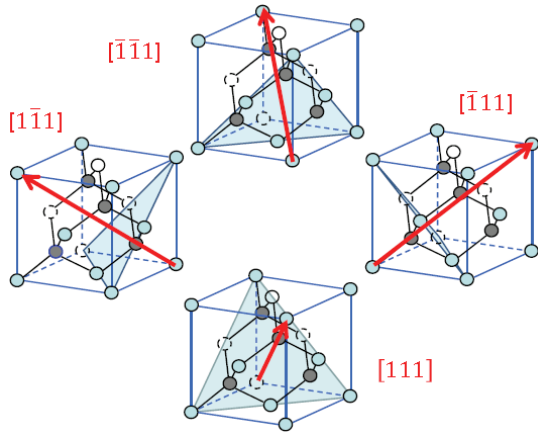


図4 HPHTによるダイヤモンド成長方向

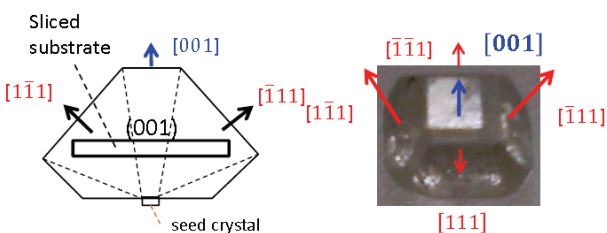


図5 HPHT結晶の外観とスライス基板の概念図

この成長セクター境界部分については、これまでの研究で電子線後方散乱回折 (EBSD) により、結晶の方位が例えば 0.02° とか 0.04° とか若干ずれていて、完全単結晶ではなく「微小角粒界」を形成した部分が一部見られることがわかっている。これを引用した図を図6に示す。絶縁性の結晶では、こういった現象は見られず、完全単結晶である。恐らく結晶時のBの取り込み、未だ十分には検討されていない高温高压の条件制御などが原因でp+HPHT特有の不良が出ているものとする。

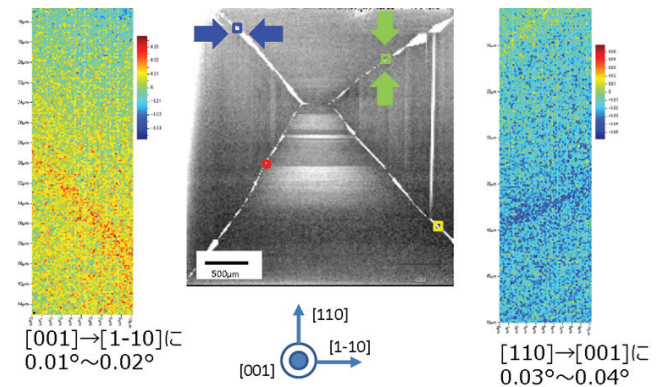


図6 EBSDで検出したp+HPHT結晶成長セクター部をはさんだ領域の回転 (中央はラマンによるダイヤモンドピーク強度マッピング。青、緑の→が測定点) ([7][8]より引用)

p+HPHT結晶のX線トポグラフィー像のもう一つの特徴は、全成長セクターで、<110>すべり方向に積層欠陥が明瞭に見られることである。セクター境界の端から端までの長い積層欠陥で、ほぼ全域に40-50μm間隔で観察される。転位欠陥は積層欠陥に垂直に長い形状のものが多数確認され、それ以外の方向の転位も存在する。表1に、このような大きな転位とその解析結果を示す。多数の中で完全に断定できたのは、バーガーズベクトルbが判明したのは[110]/2が2個、[011]/2が2個、[1-10]/2が4個、[-101]/2が2個、合計10個である。転位ベクトルがわかり、欠陥種類が判ったのが刃状 (Edge) 転位が6個、45°転位が2個である。バーガーズベクトルが判明しているが、転位ベクトルが断定できていないものが2個である。その他107個はバーガーズベクトルが不明である。転位方向は<121>が多いように見られる。以上、転位に関

して、未だわからないものの方が圧倒的に多数であり、今後さらに解析を進める予定である。

転位密度に関しては、積層欠陥を除いて、概ね 3000 cm²であり、普通クラスの絶縁結晶と変わらない。ただし、低欠陥の高品質絶縁性 HPHT 結晶は 100 cm²以下であり、それに比べると 1 桁半高いと言える。いずれにしても、p+ HPHT 結晶は開発が殆ど進んでいないため、今後パワーデバイスを目指した転位の観点から、積層欠陥や転位の低減が進み、低欠陥種結晶が実現することを期待したい。

表 1 大きな転位とその解析結果 ([8]より引用)

b vector	Possible t vector and dislocation type				Numbers
[110]/2	[-110] edge	[1-11] edge	[-112] edge	[1-12] edge	2
[011]/2	[-110] 60°	[1-11] edge	[-112] 30°	[1-12] 73°	1
unknown	[-110]	[1-11]	[-112]	[1-12]	17
[011]/2	[110] 60°	[111] 35°	[112] 30°	[-1-12] 73°	1
[1-10]/2	[110] edge	[111] edge	[112] edge	[-1-12] edge	4
unknown	[110]	[111]	[112]	[-1-12]	34
[-101]/2	[001] 45°				2
unknown	[-1-21]	[12-1]	[121]	[-1-2-1]	28
unknown	[-2-11]	[21-1]	[211]	[-2-1-1]	26
unknown	[011]	[0-1-1]	[0-11]	[01-1]	6
unknown	[1-21]	[-12-1]	[-121]	[1-2-1]	2

4. まとめ

次世代パワー半導体として期待されている、ダイヤモンドの結晶欠陥を、九州シンクロトロン光研究センターのBL09におけるX線トポグラフィーを用いて調べた。今回これまで殆ど検討のされていない、高出力用途のデバイスに不可欠な p+高温高压 (HPHT) による種結晶を調べた。絶縁結晶では見られない成長セクター境界が明瞭に見える。EBSD による結晶性の研究と併せて考えると、微小角粒界がセクター境界部に形成されているものと考えられる。また積層欠陥が全成長セクターで、<110>すべり方向に積層欠陥が明瞭に見られる。セクター境界の端から端までの長い積層欠陥で、ほぼ全域に 40-50 μm 間隔で観察される。その他転位も転位密度 3000 cm²程度存在するが、現時点で完全に解析できたものは、10 個程度にすぎない。今後パワーデバイスを目指し、積層欠陥や転位の低減が進み、低欠陥ウェハが実現することを期待したい。

謝辞

X 線トポグラフィー計測にあたりお世話になりました、九州シンクロトロン光研究センターの副主任研究員 石地耕太郎博士に深謝申し上げます。

参考文献

- [1] 福島隆文, "SiC デバイスを採用した N700S 新幹線電車駆動システムの開発", 応用物理学会 先進半導体分科会第 4 回講演会 予稿集 pp.7-8 (2017).
- [2] P.Liu, R.Yen and N.Bloembergen, "Dielectric breakdown threshold, two-photon absorption, and other optical damage mechanisms in diamond", IEEE J.Quantum Electron., **QE-14**, pp.574-576 (1978).
- [3] B.J.Baliga, "Semiconductors for high voltage, vertical channel field effect transistors", IEEE Electron Device Lett., **10**, pp.455-457 (1989).
- [4] A.Q.Huang, "New unipolar switching power device figures of merit", IEEE Electron Device Letters, **25**, pp.298-301 (2004).
- [5] S.Shikata, "Single crystal diamond wafer for high power electronics", Diamond and Related Materials, **65**, pp.168-175 (2016).
- [6] K.Ishiji, "Development of white and monochromatic X-ray topography system in SAGA-LS", Phy. Sta. Sol., **A208**, pp.2516-2520 (2011).
- [7] 松下, 土田, 堂島, 芦田, 金子, 鹿田, "電子線後方散乱回折法による p+HPHT ダイヤモンドの結晶性評価", 第 78 回応用物理学会 (秋季) 8a-PA1-4 9/5-9/8 福岡 (2017).
- [8] 鹿田, 亀井, 松下, 土田, 山口, 明石, 堂島, 芦田, 金子, 大谷, "ダイヤモンド低抵抗 p+基板の結晶性と欠陥", 応用物理学会 先進パワー半導体分科会第 4 回講演会 予稿集 pp.141-142 (2017).