

## パワーデバイス用単結晶の歪分布イメージング Strain mapping in semiconductor crystals

高橋 由美子<sup>1\*</sup>, 平野 馨一<sup>2</sup>, 志村考功<sup>3</sup>, 長町信治<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 日本大学〒274-8501 千葉県船橋市 習志野台 7-24-1

<sup>2</sup> 物質構造科学研究所, 放射光科学研究施設 〒305-0801 つくば市大穂 1-1

<sup>3</sup> 大阪大学大学院 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

<sup>4</sup>(株)長町サイエンスラボ, 〒661-0976 尼崎市潮江 1-16-1

Yumiko Takahashi<sup>1,\*</sup>, Keiichi Hirano<sup>2</sup>,  
Takayoshi Shimura<sup>3</sup>, Nobuharu Nagamachi<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Nihon University, 7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501, Japan

<sup>2</sup>Photon Factory, 1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801, Japan

<sup>3</sup>Graduate School of Engineering Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita, 565-0871, Japan

<sup>4</sup>Nagamachi Science Laboratory, 1-16-1 Shioe, Amagasaki, 661-0976, Japan

### 1 はじめに

近年、省エネルギー、環境負荷低減への要求から炭化ケイ素(SiC)・窒化ガリウム(GaN)・ダイヤモンドなどを用いたパワーデバイスの実用化を目指す世界的傾向が加速されている。これらのパワーデバイス用単結晶の結晶成長技術はまだシリコン単結晶のような高品質を得られるには至っていない上にエピタキシー、イオン注入といったプロセスを必要とするため、格子欠陥のみならず広域におよぶ歪分布も重要な因子となっている。

単結晶の評価法として X 線トポグラフィーは広く活用されており、SiC についてもこれまで多くの研究がなされているが、そのほとんどは転位などの微小欠陥に関するもので広域に渡る歪分布を観察した例は少ない。本研究では斜入射トポグラフィーとロッキングカーブ法を組み合わせ、面内方向と深さ方向の情報とを併せ持つ広域歪の評価方法を検討した。

### 2 実験

試料は 4H-SiC(0001)基板で、膜厚 5 μm のエピタキシャル層に基板温度 500°C、Al イオン濃度  $1 \times 10^{21}$  ions/cm<sup>3</sup> で注入後、1800°C で 5 分間アニールしたものである。比較のためイオン注入を行っていない試料も測定した。

実験では斜入射 X 線トポグラフィー光学系で X 線波長と入射角を変化させて試料への X 線侵入深さを制御し、試料下流にアナライザ結晶(Si(220))を配して角度フィルターとすることで格子面の傾きに敏感な画像を得た[1]。試料角度を揺動して得られる画像セットから検出器のピクセル事にロッキングカーブを作成し、その最大値・ピークシフト量を 2 次元画像に再構成することで歪分布の定量的評価を試みた。検出器には X 線 CCD カメラ(Photonic Science, XFDD)を用いた。有効ピクセルサイズは  $6.45 \times 6.45$  μm<sup>2</sup>、空間分解能は約 15 μm である。

### 3 結果および考察

図 1 にイオン注入を行っていない試料の 11-28 反射トポグラフと局所ロッキングカーブ法により得られた分布を示す。X 線波長 1.26 Å、試料への X 線入射角を 5° にとり X 線侵入深さをエピ層/基板界面近傍(2~10 μm)とした。従来の斜入射トポグラフィ光学系で得られる画像(図 1(a))に対し、アナライザ結晶を用いた光学系では図 1(b)のように試料の一部のみが鮮明になり試料の歪に敏感になっていることが分かる。ここでの「歪」は格子面間隔変化と格子面の傾きが混在したものであるが、局所ロッキングカーブ法により画素ごとの最大値を再構成することで、アナライザ結晶のアクセプタンス幅内の精度で格子面の傾きの影響が除去され、図 1(c)のように試料全面の画像が得られた。この図のコントラストは主に格子面間隔の変化に起因すると考えられる。一方、局所ロッキングカーブのピーク位置シフトをマッピングすることで試料の格子面の傾き分布が得られる

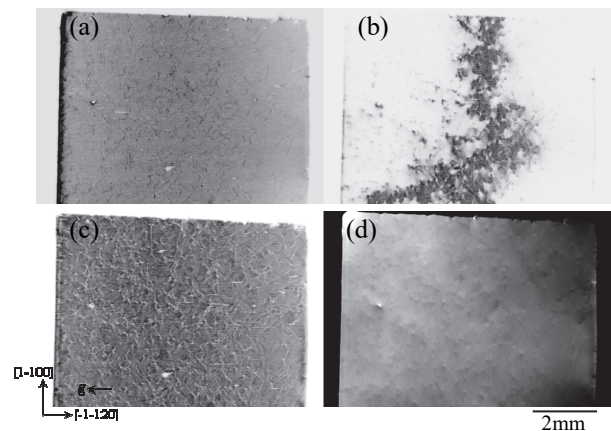


図 1 : 4H-SiC のイメージ

斜入射トポグラフ(a)とアナライザ結晶による角度分解像(b)、局所ロッキングカーブから再構成した最大強度分布(c)、ピークシフト分布(d)

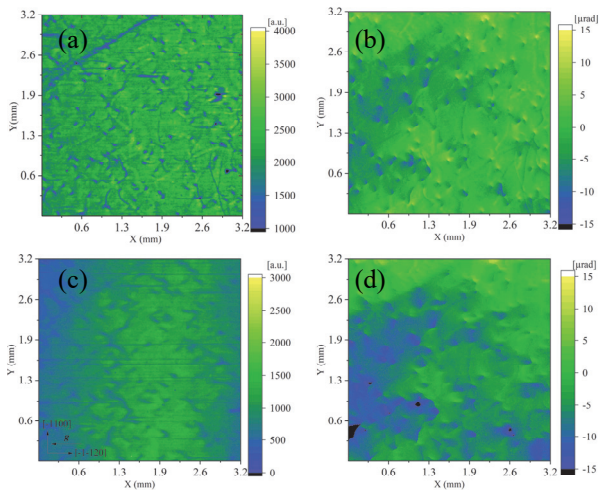


図 2：局所ロックンクカーブからの再構成図  
最大強度分布(a)(c)とピークシフト分布(b)(d)  
X線入射角は $5^\circ$  (a)(b)および $0.3^\circ$  (c)(d)

(図 1(d))。通常、格子面間隔の変化と格子面の傾きを分離するためには多方位照射によって連立方程式を解く[2]が、X線侵入深さ等を考慮すると対称反射しか使えないなど制約が大きい。本手法では一方位測定で格子面間隔変化と格子面の傾きを分離できるので任意の回折が選択可能となる。そこですべての転位像の消滅条件を回避し、かつアナライザ結晶と格子定数の近い 11-28 反射を用いることで斜入射トポグラフィの利点を生かしつつ面内の歪分布を測定することができた。

この手法を用いてイオン注入を行った試料の X 線侵入深さによる違いを観察した。X 線波長  $1.26 \text{ \AA}$  および  $1.13 \text{ \AA}$ 、試料への X 線入射角はそれぞれ  $5^\circ$  および  $0.3^\circ$  で試料の 11-28 反射を撮影した。後者の X 線侵入深さは  $0.3\sim 0.8 \text{ \mu m}$  と見積もれる。図 2 に局所ロックンクカーブから再構成した画像を示す。X 線侵入深さの深い図 2(a)では転位による歪場が鮮明であるが、極表面(図 2(b))ではその輪郭が不鮮明になり、貫通らせん転位、貫通刃状転位はほとんど識別できない。ピーク位置変化では深部(図 2(c))での平均のピークシフト値が 0 でほぼ均一な分布となっているのに対し、表面層(図 2(d))では平均  $5 \text{ \mu rad}$  程度で  $-20\sim +10 \text{ \mu rad}$  の範囲で分布している。イオン注入によってエピタキシャル層の表面近傍に生成した歪場がその後のアニーリング処理によっても完全に除去されていないことがうかがえる。

今回の実験ではアナライザ結晶のロックンクカーブ幅は実測で約  $17 \text{ \mu rad}$  で、 $20 \text{ ppm}$  程度以下の格子面間隔変化は分離できていない。測定精度を向上させより高品質の結晶に対応するためにはアナライザ結晶の回折面を高次反射にするなどの改善が必要である。

さらに、 $\omega$ - $2\theta$  スキャンで本手法を行えば CTR の 2 次元マッピング等も得られる可能性があり、より詳細な歪状態の観察が可能になると考えられる。

#### 4 まとめ

斜入射トポグラフィとロックンクカーブ法を組み合わせ、一方位測定で格子面間隔変化と格子面の傾きを分離することによって面内方向と深さ方向の情報とを併せ持つ広域歪の評価方法を確立した。

この手法で Al イオン注入 SiC 基板の歪状態を観察し、イオン注入の影響と考えられる広域の歪場を確認できた。今後、イオン注入条件を変化させたときの歪状態を詳細に検討することによってパワーデバイス用単結晶の結晶品質・デバイス技術の改善に有用な知見が得られるものと思われる。

#### 謝辞

本研究は科研費基盤(c)(16K05008)の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] T. Ishikawa, et. al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **24**, L559 (1985).
- [2] S. Kikuta and K. Kohra, *Jpn. J. Appl. Phys.* **5**, 1047 (1966).

\* yumikot@lebra.nihon-u.ac.jp