

# 斜入射トポグラフィーによるイオン注入 SiC 結晶の歪分布解析 Strain mapping in ion-implanted SiC crystals by grazing incidence topography

高橋 由美子<sup>1,\*</sup>, 平野 馨一<sup>1</sup>, 吉村 順一<sup>1</sup>, 志村 考功<sup>2</sup>, 長町 信治<sup>3</sup>

<sup>1</sup>放射光科学研究施設, 〒305-0801 つくば市大穂 1-1

<sup>2</sup>大阪大学大学院工学研究科, 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

<sup>3</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>1</sup>, Jun-ichi Yoshimura<sup>1</sup>,

Takayoshi Shimura<sup>2</sup>, Nobuharu Nagamachi<sup>3</sup>

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

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

<sup>3</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が高まるなかでワイドギャップ半導体を用いたパワーデバイス実用化への取り組みが進められている。特に SiC は Si に比べ低電力損失、高耐圧特性を有することから高性能パワーデバイスとしての期待が大きい。しかしそのプロセス技術は発展途上であり、数百度の高温注入と 1500°C 以上の高温アニールを必要とするイオン注入技術では注入条件と結晶欠陥の関係を解明して注入条件の最適化を図る必要がある。

本研究では広域に渡る歪分布に着目し、イオン注入条件の影響を詳細に評価する方法を検討した。

## 2 実験

試料は 4H-SiC(0001)基板で膜厚 5 $\mu\text{m}$  のエピタキシャル層に Al イオン注入を行ったものである。注入濃度は  $1 \times 10^{19} \sim 1 \times 10^{21} / \text{cm}^3$ 、注入時温度は室温 $\sim 500^\circ\text{C}$ 、アニール温度は 1600 $\sim 1800^\circ\text{C}$  と注入条件を変化させている。Al イオンは表面から 200nm 付近までほぼ均一に分布している。

斜入射トポグラフィーは動力学回折理論(岸野の理論[1])を用いて X 線侵入深さ  $l$  を見積もり、X 線波長  $\lambda$  と入射角  $\alpha$  を決定して試料の 11-28 反射を原子核乾板に撮影した。また、局所ロッキングカーブ測定による 2 次元マッピング[2]を組み合わせることにより歪分布の定量的評価を試みた。撮影には X 線 CCD カメラ(Photonic Science)を用いた。有効ピクセルサイズは  $23 \times 23 \mu\text{m}^2$ 、空間分解能は約 50  $\mu\text{m}$  である。

## 3 結果および考察

図 1 に基板温度 150°C で  $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$  の Al イオン注入後 1800°C で 5 分間アニールした試料のトポグラフを示す。最も深いところ(a)では貫通刃状転位・貫通らせん転位・基底面転位が識別でき、基板の影響も現れている。極表面(d)ではイオン注入・アニール処理に関して発生したと考えられるマクロな歪場が観察される。イオン注入条件の違いを比較した例

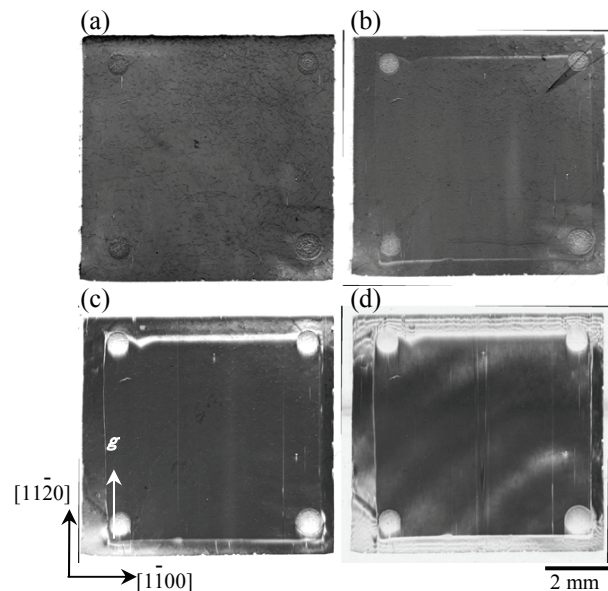


図 1 X線侵入長を変化させた Al イオン注入 4H-SiC のトポグラフ

- (a)  $\lambda = 0.126 \text{ nm}$ ,  $\alpha = 5.0 \text{ deg}$ ,  $l \approx 1.7 \mu\text{m}$ ,  
 (b)  $\lambda = 0.118 \text{ nm}$ ,  $\alpha = 2.0 \text{ deg}$ ,  $l \approx 0.9 \mu\text{m}$ ,  
 (c)  $\lambda = 0.114 \text{ nm}$ ,  $\alpha = 0.4 \text{ deg}$ ,  $l \approx 0.38 \mu\text{m}$ ,  
 (d)  $\lambda = 0.113 \text{ nm}$ ,  $\alpha = 0.2 \text{ deg}$ ,  $l \approx 0.25 \mu\text{m}$ .

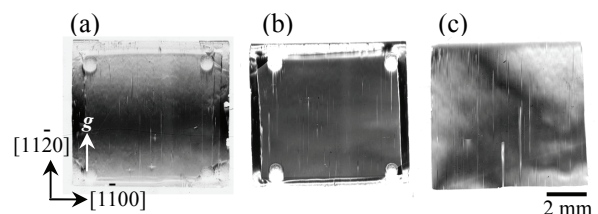


図 2 イオン注入量の異なる試料のトポグラフ

- (a)  $1 \times 10^{21} / \text{cm}^3$ , (b)  $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ , (c) イオン注入無し。  
 $\lambda = 0.113 \text{ nm}$ ,  $\alpha = 0.2 \text{ deg}$ ,  $l \approx 0.25 \mu\text{m}$ .

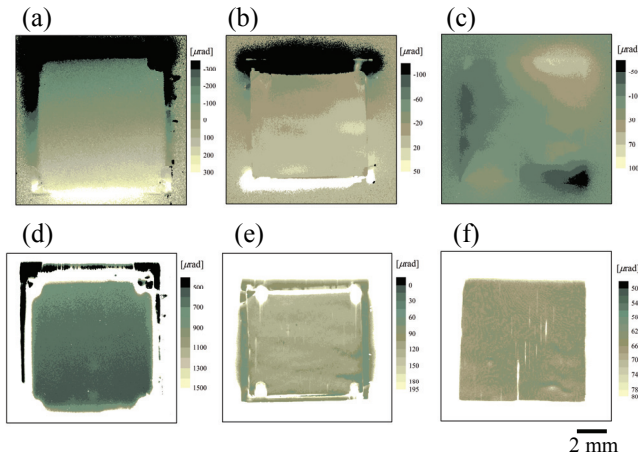


図3 局所ロッキングカーブからの再構成  
(a)-(c)ピーク位置分布、(d)-(f)ピーク幅分布  
(a),(d)  $1 \times 10^{21} / \text{cm}^3$ , (b),(e)  $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ , (c),(f)イオン注入無し。 $\lambda = 0.113 \text{ nm}$ ,  $\alpha = 0.2 \text{ deg}$ ,

表1 図3のピーク位置分布・ピーク幅分布から得られる統計値(単位:  $\mu\text{rad}$ )

	Mean	StdDev	Min	Max
(a)	-44.0	103.5	-293.2	670.2
(b)	3.5	8.3	-23.6	26.8
(c)	2.5	16.1	-27.9	48.9
(d)	445	50	265	2904
(e)	225	36	147	426
(f)	597	46	540	1740

としてイオン注入量の異なる試料の極表面の状態を図2に示す。基板温度  $500^\circ\text{C}$ 、アニール温度  $1800^\circ\text{C}$ 、アニール時間 5 分の試料を用いた。ブロードなコントラストの変化は試料ごとに異なり、イオン注入・アニール処理条件がマクロな歪場に影響するものと思われる。

この試料のロッキングカーブから抽出したピーク位置・ピーク幅の分布状態を比較すると(図3、表1)、イオン注入量が最も多い  $1 \times 10^{21} / \text{cm}^3$  の試料(a),(d)では極表面でイオン注入していない試料(c),(f)の10倍以上のピーク位置分布幅があるがピーク幅には大きな差が無く、基板の湾曲等があるものと考えられる。一方、イオン注入量が  $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$  の試料(b),(e)ではピーク位置・ピーク幅ともイオン注入していない試料(c),(f)より分布幅が小さく、アニールが効果を発揮している可能性がある。但し、今回の試料は同一基板から切り出した試料片に異なる条件のイオン注入を行っているので基板自体の表面状態も影響している可能性もある。

さらに詳細に歪の状態を観察するため、11-28 反射と-1-128 反射のロッキングカーブから抽出したピーク位置分布から格子面の傾斜分布と格子面間隔変化分布とを分離したものを図4に示す。試料のイオン注入条件は基板温度  $500^\circ\text{C}$ 、Al イオン注入量

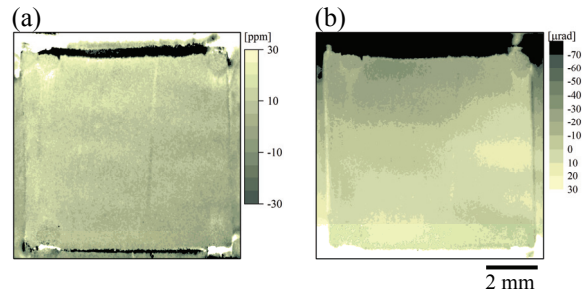


図4 局所ロッキングカーブからの再構成  
(a) 格子面間隔変化、(b) 格子面の傾斜分布  
 $\lambda = 0.113 \text{ nm}$ ,  $\alpha = 0.2 \text{ deg}$ ,  $l \approx 0.25 \mu\text{m}$ .

$1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ 、アニール  $1800^\circ\text{C}$ 、5 分で図3(b)のピーク位置分布から分離したものである。トポグラフ図2(b)に見られる濃淡は概ね格子面間隔変化と格子面の傾斜分布の重ね合わせに対応し、60 ppm程度の格子面間隔変化と約 $\pm 50 \mu\text{rad}$ の傾きがあることが分かった。他の試料についても同様の解析を進めている。現状での定量値は測定環境の影響を受けて多少変化するので定量精度の向上が課題である。今後は逆格子マッピング[3]等を併用して定量精度の検討を行う。

#### 4 まとめ

X線侵入深さを制御した斜入射トポグラフィーによって Al イオン注入 SiC 基板では広域の歪場が極表面層に集中していることが分かった。局所ロッキングカーブ法により歪分布状態を定量的に解析することでイオン注入条件の違いをより詳細に評価することが可能である。本研究の手法はイオン注入プロセス最適化のための基礎情報を提供することを可能にし、パワーデバイスのプロセス技術確立への貢献が期待できるものと思われる。

#### 謝辞

本研究は科研費基盤(c)(24560069)の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] S. Kishino and K. Kohra, *Jpn. J. Appl. Phys.* **10**, 551 (1971).
- [2] 志村考功, 細井卓治, 渡部平司. *日本結晶学会誌* **54**, 47 (2012).
- [3] T. Shimura, Y. Takahashi, K. Hirano, N. Nagamachi, T. Hosoi and H. Watanabe, *Photon Factory Activity Report 2014 B* **32**, No283 (2015).

\* yumikot@post.kek.jp