



九州シンクロトロン光研究センター 県有ビームライン利用報告書

課題番号：2009098S

B L 番号：BL09

(様式第 5 号)

高輝度白色 X 線照射による ダイヤモンド電子デバイスの劣化機構解析

Degradation behavior of diamond-based electronics upon high-brightness white X-ray irradiation

大曲 新矢¹、Sittimart Phongsaphak^{1,2}、岩尾友貴^{1,2}、片宗優貴³、吉武剛²
Shinya Ohmagari¹, Sittimart Phongsaphak^{1,2}, Tomoki Iwao^{1,2}, Yuki Katamune³, and Tsuyoshi Yoshitake²

1 国立研究開発法人産業技術総合研究所センシングシステム研究センター
Sensing System Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

2 九州大学大学院総合理工学府量子プロセス理工学
Department of Applied Science for Electronics and Materials, Kyushu University

3 九州工業大学大学院電気電子工学研究系
Graduate School of Engineering, Kyushu Institute of Technology

- ※ 1 先端創生利用（長期タイプ）課題は、実施課題名の末尾に期を表す（Ⅰ）、（Ⅱ）、（Ⅲ）を追記してください。
- ※ 2 利用情報の公開が必要な課題は、本利用報告書とは別に利用年度終了後 2 年以内に研究成果公開（論文（査読付）の発表又は研究センターの研究成果公報で公表）が必要です（トライアル利用を除く）。
- ※ 3 実験に参加された機関を全てご記載ください。
- ※ 4 共著者には実験参加者をご記載ください（各実験参加機関より 1 人以上）。

1. 概要（注：結論を含めて下さい）

ダイヤモンドは大きなバンドギャップを有し、高温でも低い真性キャリア濃度を有することから、高温・放射線環境等の特殊環境で動作する半導体デバイスとして期待されている。今回は、ダイヤモンドデバイスの X 線照射による劣化挙動を評価するために、高輝度なシンクロトロン光を用いた照射実験を行った。白色 X 線照射前後のダイヤモンド基板の結晶性を X 線トポグラフィ法で評価したところ、12.5 MGy 照射後も大きな結晶性の乱れは確認されなかったが、基板エッジ部の一部の領域で転位・積層欠陥の導入が確認された。

(English)

Because diamond has a large band gap and a low intrinsic carrier concentration even at high temperatures, it can be operable in harsh environments such as high temperature and radiation environments. In this study, we performed irradiation experiments using high intensity synchrotron radiation to evaluate the degradation behavior of diamond devices. The crystalline properties of diamond substrates before and after white X-ray irradiation were evaluated by X-ray topography. No significant crystalline degradation was observed after 12.5 MGy irradiation, but dislocations and stacking defects were partially introduced in some regions, mainly at the substrate edges.

2. 背景と目的

航空宇宙産業，原子力発電，核融合炉など過酷環境下で動作する IoT・センサー，信号処理デバイスの信頼性向上のために，半導体材料の革新が進められている．ワイドバンドギャップ半導体である炭化ケイ素 (SiC) は，Si の 10 倍以上の耐放射線性を有しており，高温や高い放射線照射下でも安定動作可能な半導体デバイスとして応用が期待されている．これまでに，SiC-MOSFET 構造で，高温下で数 MGy を超える高いガンマ線耐性が確認されている．

ダイヤモンドは単一元素からなる半導体材料であり，炭素原子同士の強固な化学結合に起因した大きなバンドギャップ ($E_g = 5.5 \text{ eV}$)，高いキャリア移動度，高温でも低い真性キャリア濃度を特徴としており，高速・高温・低損失動作が可能な電子デバイスへの応用が期待されている．これまでに，ショットキー金属/ダイヤモンド半導体構造をベースとした，ダイオード，金属-半導体電界効果トランジスタ (Metal-semiconductor field-effect transistor) 構造において，10 MGy の X 線照射後においても優れたデバイス特性を示すことが報告されている [Umezawa, Ohmagari *et al.*, Int. Symp. Power Semicond. Devices IC's (2017) 379-382]. 原子炉や核融合炉では，高温・放射線環境に加え，腐食性環境による素子劣化が想定されているが，ダイヤモンド半導体は優れた特性から，その全ての要求を満たす素子を実現できる可能性がある．

本実験では，ダイヤモンドエレクトロニクスの劣化機構を評価するために，高輝度白色 X 線照射前後でのデバイス特性比較を行う．また，ダイヤモンドそのものの材料劣化を評価するために，同時に X 線トポグラフィ法による欠陥構造評価を実施する．デバイス特性，結晶構造の両面からの評価により，ダイヤモンドの高い放射線性を実証する．

3. 実験内容 (試料、実験方法、解析方法の説明)

単色 X 線トポグラフィ BL09

- ・単結晶ダイヤモンド (100)
- ・非対称ブラッグ反射条件，{044}，{113}
- ・斜入射条件で，基板と膜 (約 20-50 μm) を分離して観察する
- ・イメージングプレートで観察
- ・試料サイズ 3mm 角

結晶構造：ダイヤモンド構造

主要面：(100)

基板：高温高圧製ダイヤモンド単結晶

薄膜：不純物 (B, P) ドープダイヤモンド

4. 実験結果と考察

BL09 の高輝度白色 X 線照射時における，ダイヤモンド 3 \times 3 \times 0.5 mm 厚の吸収線量を計算したところ，大気中の照射で，約 700 Gy/sec の線量率 (蓄積電流 200 mA 時) が得られることが分かった．今回は，2.5 MGy の照射間隔で，照射前後の結晶性劣化を X 線トポグラフィ法にて評価した．図 1 (a) に照射前の X 線トポグラフィ像を示す．基板には，高温高圧製ダイヤモンド (100) を用い，回折面は 113 とした．基板中央部の転位密度は，400 cm^{-2} 以下であった．図 1 (b) に 12.5 MGy 照射後の X 線トポグラフィ像を示す．結晶性の大きな劣化は見られないものの、

一部の領域で転位や積層欠陥の導入が確認された。導入された転位種の解析、導入メカニズム、デバイス特性に与える影響については今後評価を進めていく予定である。

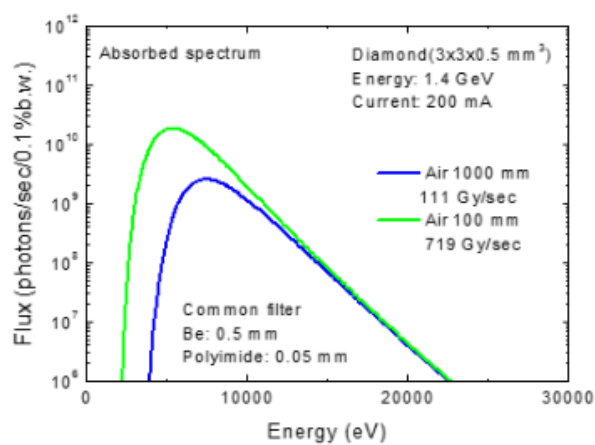


図1. ダイヤモンド(3×3×0.5 mm³)における、X線吸収スペクトル。

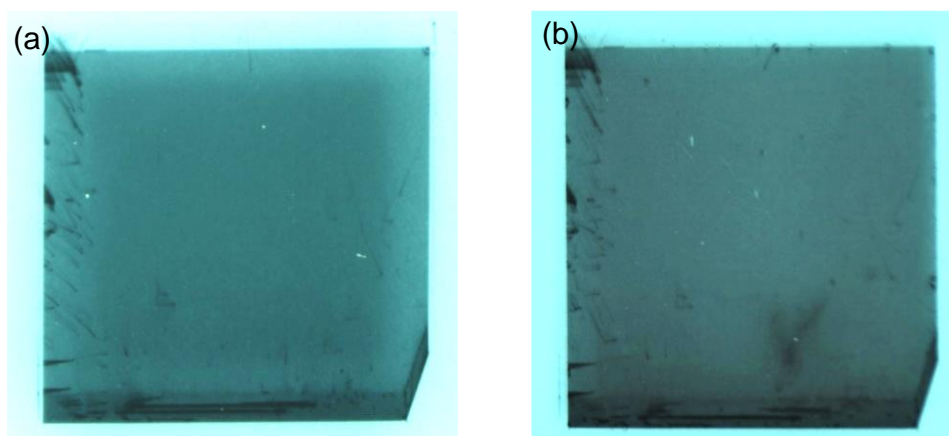


図1. ダイヤモンド高温高圧製基板 (100) のX線トポグラフィ評価。(a) 照射前、(b) 12.5 MGy 照射後。回折面は113。

5. 今後の課題

ダイヤモンドのX線照射損傷について、転位導入のメカニズムも含めた解析が必要である。また、各種デバイス(ダイオード、FET)構造におけるデバイス挙動の劣化も評価を進めていく予定である。

6. 参考文献

[1] "Suppression of killer defects in diamond vertical-type Schottky barrier diodes"

A. Kobayashi, S. Ohmagari (Corr. Author), H. Umezawa, D. Takeuchi, and T. Saito

Jpn. J. Appl. Phys. 59, SGGD10 (2020).

[2] "Toward High-Performance Diamond Electronics: Control and Annihilation of Dislocation Propagation by Metal-Assisted Termination"

S. Ohmagari, H. Yamada, N. Tsubouchi, H. Umezawa, A. Chayahara, Y. Mokuno, and D. Takeuchi
Phys. Status Solidi A 1900498 (2019). FEATURE ARTICLE DOI: 10.1002/pssa.201900498

[3] "Doping-induced strain in heavily B-doped (100) diamond films prepared by hot-filament chemical vapor deposition"

S. Ohmagari, H. Yamada, H. Umezawa, A. Chayahara, Y. Mokuno
Thin solid films 680, 85 (2019).

[4] "Thermally stable heavily boron-doped diamond resistors fabricated via selective area growth by hot-filament chemical vapor deposition"

S. Suzuki, S. Ohmagari (Corr. Author), H. Kawashima, T. Saito, H. Umezawa, and D. Takeuchi
Thin solid films 680, 81 (2019).

[5] "Schottky barrier diodes fabricated on diamond mosaic wafers: dislocation reduction to mitigate the effect of coalescence boundaries"

S. Ohmagari, H. Yamada, N. Tsubouchi, H. Umezawa, A. Chayahara, A. Seki, F. Kawaii, H. Saitoh, and Y. Mokuno
Appl. Phys. Lett. 114, 082104 (2019). Editor's pick <https://doi.org/10.1063/1.5085364>

[6] "Improved drain current of diamond metal-semiconductor field-effect transistor by selectively grown p+ contact layer"

H. Kawashima, S. Ohmagari, H. Umezawa, and D. Takeuchi
Jpn. J. Appl. Phys. 58, SBDD17 (2019).

[7]"Large reduction of threading dislocations in diamond by hot-filament chemical vapor deposition accompanying W incorporations"

S. Ohmagari, H. Yamada, N. Tsubouchi, H. Umezawa, A. Chayahara, S. Tanaka, and Y. Mokuno
Appl. Phys. Lett. 113 (2018) 032108. <https://doi.org/10.1063/1.5040658>

[8]"Growth and characterization of freestanding p+ diamond (100) substrates prepared by hot-filament chemical vapor deposition"

S. Ohmagari, H. Yamada, H. Umezawa, N. Tsubouchi, A. Chayahara, and Y. Mokuno
Diamond and Related Materials 81 (2018) 33. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2017.11.003>

[9]"Lifetime and migration length of B-related ad molecules on diamond {100}-surface: Comparative study of hot-filament and microwave plasma-enhanced chemical vapor deposition"

S. Ohmagari, M. Ogura, H. Umezawa, and Y. Mokuno
Journal of Crystal Growth 479 (2017) 52. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2017.09.022>

[10]"Characterization of X-Ray Radiation Hardness of Diamond Schottky Barrier Diode and

Metal-Semiconductor Field-Effect Transistor"

H. Umezawa, S. Ohmagari, Y. Mokuno, and J.H. Kaneko

7. 論文発表・特許（注：本課題に関連するこれまでの代表的な成果）

なし

8. キーワード（注：試料及び実験方法を特定する用語を2～3）

ダイヤモンド、単結晶、ダイオード、X線照射、トポグラフィ

9. 研究成果公開について（注：※2に記載した研究成果の公開について①と②のうち該当しない方を消してください。また、論文（査読付）発表と研究センターへの報告、または研究成果公報への原稿提出時期を記入してください。提出期限は利用年度終了後2年以内です。例えば2018年度実施課題であれば、2020年度末（2021年3月31日）となります。）

長期タイプ課題は、ご利用の最終期の利用報告書にご記入ください。

① 論文（査読付）発表の報告

（報告時期： 2022年 3月）