過酷環境に対応可能な新規パワーFET デバイスの創出

Fabrication of advanced power FET devices for harsh environment application

川江 健# Takeshi Kawae[#] College of Science & Engineering, Kanazawa University

Abstract

Ferroelectric Pb(Zr,Ti)O₂/Al₂O₃ bi-layer gate and p⁻-diamond channel structures were prepared on the (111) diamond substrates. Al₂O₃ barrier layer with 10 nm thick was deposited by thermal atomic layer deposition to suppress the diffusion of component elements between gate and channel. Each prepared bi-layer gate and channel structures indicated conventional ferroelectric behavior with excellent insulating properties and conductive properties with linearity, respectively. After Γ -ray irradiation with total dose of 15.4 [kGy], change of dielectric constant of bi-layer gate structure was observed due to the change of component material or amorphous phase. On the other hand, there was no degradation of ferroelectric and insulating properties of bi-layer gate and conductivity of channel structure for Γ -ray irradiation.

Keyword: wide-gap semiconductor, ferroelectric gate, field effect transistor, Γ -ray irradiation

1. はじめに

近年、宇宙機器産業の推進・育成が各国の重要技 術戦略の一つに掲げられている[1]。電気機器を宇宙 空間で使用するには、当該機器への供給手段が著し く制限される電気エネルギーを低損失・高効率に利 用可能なパワーデバイスの活用が不可欠である。同 時に、宇宙デバイスには放射線や熱線に晒される極 めて過酷な環境下での長期安定動作が絶対的な条件 として求められる。

また、東日本大震災により壊滅的ダメージを負っ た福島第一原発の復旧・廃炉作業に関して、10年を 経て日々明らかとなる被災現場の状況に応じた多様 な技術・手法が検討されている。現在までに多くの アプローチが提案されてきたが、電気機器類に対す る一貫した必須事項として「高強度放射線下におけ る安定的な動作」が挙げられる。特に、オペレータ の安全性を担保する為には、機器類に対する長期間 の無人動作が前提であり、前述した宇宙機器と同様 に過酷環境下で動作可能な高効率パワーデバイスの 導入が強く望まれる。

優れた放射線耐性と高温動作が期待される次世代 パワーデバイス材料としてワイドギャップ半導体ダ イヤモンドが挙げられる。研究代表者は巨大分極誘 起と放射線・高温耐性を有する強誘電体とダイヤモ ンド半導体を融合した強誘電体ゲート電界効果トラ ンジスタ(FeFET)の創出を提案し、有機強誘電体 VDF-TrFEをゲートとしたダイヤモンド FeFET にお ける高効率キャリア誘起とゲート残留分極を利用し た疑似ノーマリオフ動作を実証してきた[2-4]。一方、 有機物である VDF-TrFE は高温動作・放射線耐性に 資する事が物理的に不可能である為、無機強誘電体 ゲート構造を用いたダイヤモンド FeFET を創出し、 過酷環境下での動作特性に関する網羅的な検証が求 められる。

これまでに、高温・放射線耐性を兼ね備えた FeFET

デバイスの創出を念頭に、強誘電体 Pb(Zr,Ti)O3 (PZT) ゲートとワイドギャップ半導体 ZnO をチャネルとし た FeFET を作製し、「FeFET 構造におけるガンマ線 照射に対する脆弱箇所の同定」に特化した基礎検討 を実施した。トータルドーズ量 20[Gy]のガンマ線照 射に対し、同デバイス構造におけるチャネル-強誘電 体ゲート界面の元素拡散が最も憂慮すべき事象であ る事を明らかにした。一方、安定なデバイス動作に 向けて懸念される強誘電体ゲート構造部に対する絶 縁性や分極誘起能の顕著な劣化は見られなかった [5,6]。

前年度までの研究遂行を通して明らかにされた事 項に基づき、本研究課題では、「ダイヤモンド FeFET 構造における高強度ガンマ線照射耐性」を中心に据 えた基礎検討を実施した。具体的には、ダイヤモン ド FeFET を構成する、MFIS 型ゲート構造およびダ イヤモンドチャネルに関して、前年度の約 1000 倍の 強度のガンマ線照射に対するデバイス特性の変化を 調査した。特に、当該デバイス構造に対する高強度 ガンマ線照射による特性劣化・変質の有無や主たる 要因に関する検証を行った。

2. 実験方法

2.1 試験試料の作製

高強度ガンマ線照射を行う試料として、 Au/PZT/Al₂O₃/p⁺ダイヤモンドのMFISゲートおよび p⁺ダイヤモンドをコンタクト部とした p⁻ダイヤモン ドチャネルの2種のデバイス構造を作製した。

MFIS ゲート構造に関して、Au は真空蒸着法、PZT は CSD 法、Al₂O₃ は ALD 法を用いて堆積した。ま た、 p^+ ダイヤモンド (B 濃度: 10^{20} [cm⁻³]) は MPCVD 法を用いて、(111)ダイヤモンド基板上に堆積した。 なお、Al₂O₃ 層は前年の研究遂行で明らかにされた 「ガンマ線照射時におけるチャネル-強誘電体ゲー

ト界面の元素拡散」を考慮し、緻密な界面バリア層 として機能させる事を目的として、サーマル ALD 法 を用いて形成した。また、比較試料として、p⁺ダイヤ モンドを Pt/Si 基板に変更した MFIM 構造も作製・評 価した。

p⁻ダイヤモンドチャネル構造に関して、p⁻ダイヤモンド(B濃度:10¹⁷[cm⁻³])層をMPCVD法を用いて、(111)ダイヤモンド基板上に堆積した。その後、p⁺ダイヤモンド層をオーミックコンタクト部として p⁻ダイヤモンド(B濃度:10¹⁷[cm⁻³])上に選択ホモエピ成長させたソース・ドレイン2端子構造を作製した。

2.2 ガンマ線照射条件と評価項目

作製した試料に対し、QST 高崎量子応用研究所・ コバルト第1棟2 セルにおいて、照射強度 0.537、 3.84[kGy/h]、照射時間4時間の条件でガンマ線照射 を行った(トータルドーズ量:2.15、15.4[kGy])。試 料の評価として、ガンマ線照射前後における MFIS ゲ ートの XRD、P-V、I-V、C-V 特性、ダイヤモンドチ ャネルに対する XRD、I-V 特性をそれぞれ検証した。

3. 結果と考察

3.1 ガンマ線照射に対する MFIS 構造の各種特性の 変化

図1に記す P-V 特性の測定結果より、作製した試料はいずれもリーク電流が低く、明瞭な強誘電性ヒステリシスループを示す事を確認した。また、観測された残留分極値は40-60[μ C/cm²]であり、PZT の物性値に対する顕著な劣化等は生じていない。一方、P-V 特性における抗電圧 2V。は約40[V]程度と大きく、飽和分極状態に要する印加電圧も60[V]超であった。これは、PZT に直列に導入された厚さ10[nm]のAl₂O₃層の容量成分によりPZT に対する実効的な印加電圧が減少した事に由来するものと考えられる。





図 2(a, b)に MFIS 構造に対するトータルドーズ量 15.4[kGy]のガンマ線照射前後における P-V 特性を記 す。両試料において、ガンマ線照射による顕著な特 性劣化は確認されなかった。特に、前年度の検証で 見られた PZT-ダイヤモンド界面における構成元素 成分の熱拡散に由来する非対称特性も観測されなか った。この結果は、PZT-ダイヤモンド界面に導入し たサーマル ALD 法で堆積した Al₂O₃層がバリア層と して機能した事を強く示唆する結果と考える。

また、リーク電流に関して、Al₂O₃層の導入により MFIS 構造の絶縁性が大幅に向上した事から詳細な 差異の確認には至らなかったが、ガンマ線照射に伴 うリーク電流の増加現象は一切確認されなかった。 なお、ダイヤモンド基板上に形成した MFIS 構造に 対し、トータルドーズ量 15.4[kGy]のガンマ線照射後 に最大印加電圧を 100[V]まで変化させた試料の P-V 特性を図 2(c)に示す。絶縁耐圧の低下は一切見られ ず、当該構造の優れたガンマ線照射耐性が確認され た。



Figure 2. P-V curves of MFIS gate structure prepared on (a) Pt/Si, and (b, c) diamond substrates before/after of Γ -ray irradiation.

次に、ガンマ線照射に伴う各構成物質およびアモ ルファス成分の変質に由来する特性変化の有無に関 する検証として、試料の C-V 特性を評価した。図 3 にガンマ線照射前後の試料の C-V 特性を示す。分極 反転に伴うバタフライ構造の形状や抗電圧の値に大 きな変化は生じていない事が分かる。一方、C-V 特 性のゼロバイアス点における容量値から算出した MFIS 構造の誘電率に関して、基板面内に複数作製し た試料構造の一部においてガンマ線照射に対して最 大で約 20%の増減が見られた。この原因として、基 礎特性に対する試料面内の顕著な不均一性は確認さ れていない事から、上述の構成物質・アモルファス 成分の僅かな変質が考えられる。

一方、ガンマ線照射後試料の XRD 計測において、 明らかな構成物質の変質は観測されなかった。また、 本実験では各種電気特性の測定系としてニードルタ イプのプローバシステムを用いており、複数回の測

定に伴う上部電極の一部が削れた事による実効的な 電極面積の変化も無視できない事から、より多くの 試料に対する追加検証やXPSを用いた構成物質の結 合状態などに関する詳細解析が必要であると考える。



Figure 3. C-V curve of prepared MFIS gate structure before/after of Γ -ray irradiation.

3.2 ガンマ線照射に対する p ダイヤモンドチャネル 構造の I-V 特性の変化

図4にp-ダイヤモンドチャネル構造に対するトー タルドーズ量 15.4[kGy]のガンマ線照射前後におけ る I-V 特性を記す。同一基板上に形成した複数試料 の測定結果に関して、ガンマ線照射前後において明 確な電流値の減少は確認されなかった。また、線形 プロットで記した同試料に対する測定結果(図4 inset.)より、ガンマ線照射に伴う線形性の消失も確 認されなかった。

以上の事より、ダイヤモンドチャネルおよび p⁻/p⁺ ホモエピ層界面の劣化現象(ショットキー障壁の形 成など)は生じていないものと考える。この結果は、 改めてダイヤモンド半導体の優れたガンマ線照射耐 性を裏付けたものと言える[7,8]。



Figure 4. I-V curves of p⁻diamond channel structures before/after of Γ -ray irradiation.

3.3 確認された事項の主因と対策

本実験で観測された結果をまとめると、トータル ドーズ量 15.4[kGy]のガンマ線照射に対する MFIS ゲ ート構造における変質として、(1) PZT/Al₂O₃ バイレ イヤー構造の誘電率の変化(最大約 20%)が試料の ー部で確認された。一方、(2) Al₂O₃バリア層と p⁺ダ イヤモンド界面、(3) PZT ゲートの絶縁性・強誘電性、 (4) p⁺ホモエピ層をコンタクトとした p⁻ダイヤモンド チャネルに関する特性劣化は確認されなかった。以 上の事より、PZT/Al₂O₃バイレイヤー構造中の構成物 質・アモルファス成分の変質が現段階におけるガン マ線照射に対する主な劣化と考えられる。確認され た変質現象に対する本質的な起源の解明には、XPS による結合状態の評価・検証が求められる。

また、サーマル ALD 法で堆積した Al₂O₃ バリア層 を MFIS ゲート構造に導入する事により優れた絶縁 性と界面保護の効果が得られ、過酷環境で動作可能 なパワーFeFET の創出に関する懸念事項であったチ ャネル-強誘電体ゲート界面での元素拡散現象に対 する有用な解決策である事が明らかになった。一方、 形成した MFIS ゲート構造の分極反転に 60[V]超の 動作電圧が必要であった。これは、Al₂O₃バリア層の 厚さが 10[nm]である事から、PZT-Al₂O₃ 直列キャパ シタ構造から見積もられる印加電圧に対する分圧比 が PZT: Al₂O₃ = 1:3 に依るものと考えられる。より 薄膜化してもサーマル ALD Al₂O₃層の絶縁性が維持 される事を前提とすれば、Al2O3層の厚さを2[nm]と する事で分圧比は PZT: Al₂O₃ = 1:0.6 となり、分極 反転動作に必要な最大印加電圧は 24[V]程度まで低 減可能となる(FeFET デバイスを動作させる際は直 流電圧駆動であり、約15[V]程度)。

本年度の研究遂行により、当該構造の各基礎特性 に対する優れたガンマ線照射耐性が明らかにされた 事から、ダイヤモンド FeFET のパワーデバイス特性 (オン抵抗、しきい値電圧シフト、キャリア移動度 など)に関する総合的な検証が求められる。また、 強誘電体ゲート材料として現在用いている PZT に加 え、キュリー温度と分極誘起能に優れる BiFeO3 を採 用した当該デバイス構造の形成もより優れた動作性 能の獲得に有用であるものと考える[9]。

4. まとめ

過酷環境での動作を可能とする強誘電体ゲート型 パワーFETの創出を目指し、ダイヤモンド FeFET を 構成する MFIS 型ゲート構造およびダイヤモンドチ ャネルに関して、高強度ガンマ線照射に対するデバ イス特性の変化を検証した。

トータルドーズ量 15.4[kGy]のガンマ線照射に対 し、Al₂O₃バリア層を MFIS ゲート構造に導入する事 により優れた絶縁性と界面保護の効果が得られる事 を明らかにした。さらに、p⁺ホモエピ層をコンタクト 部としたダイヤモンドチャネル構造の優れたガンマ 線照射耐性を確認した。

以上の結果より、放射線耐性に優れるダイヤモン ドと無機強誘電体の融合デバイス構造に対する優位 性を強く示唆する結果が得られたものと考える。

参考文献

- [1] 内閣府・宇宙産業ビジョン 2030、 https://www8.cao.go.jp/space/vision/mbrlistsitu.pdf
- [2] T. Kawae, et al., Appl. Phys. Lett. 108, 242101 (2016)
- [3] T. Kawae, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 56, 10PF06 (2017)
- [4] T. Kawae, *et al.*, International Workshop on Plasma Technology for Diamond Growth and Diamond Device Fabrication (2019)
- [5] 玉村達哉「パワーデバイス応用を指向した強誘電体 ゲート型ダイヤモンド FET の開発」、金沢大学大学 院自然科学研究科 修士論文 (2021)
- [6] T. Kawae, *et al.*, QST Takasaki Annual Report 2020, 1-10, pp 35, (2021).
- [7] T. Yamaguchi, et al., App. Phys. Lett., 118, 162105 (2021)
- [8] K. Ueno, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 58, 106509 (2019)
- [9] Y. Nomura, et al., Physica Status Solidi B, 252, 833 (2015)