

[20013]

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

Al-ZnO channel field effect transistor with ferroelectric Pb(Zr,Ti)O₂ (PZT) gate (FeFET) were prepared on the Pt/SiO₂/Si and SrRuO₃-coated SrTiO₃ substrates. Each PZT gate was prepared by chemical solution deposition and pulsed laser deposition, respectively. Prepared FeFETs indicated conventional n-type FET behavior with ferroelectric hysteresis. After Γ -ray irradiation with total dose of 20Gy, shift of I_D-V_G curves and decrease of maximum I_D of FeFETs were observed due to interfacial diffusion. On the other hand, there was no degradation of ferroelectric and insulating properties of PZT gate for Γ -ray irradiation.

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

1. はじめに

近年、宇宙機器産業の活性化が各国の重要技術戦略の一つに掲げられている[1]。宇宙空間で利用する電気機器には、唯一のエネルギー源である太陽電池が作る電力を低損失に利用可能とするパワーデバイスが不可欠である。同時に、宇宙デバイスは、放射線や熱線に晒される極めて過酷な環境下での安定動作が絶対条件となる。

また、現在の我が国における重要課題である原発廃炉の現場においても、高強度放射線下における効率的な作業機器動作を可能とするパワーデバイスの導入が切望される。

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ダイヤモンドが挙げられるが、ダイヤモンドは深い不純物準位により効率的なキャリア活性化が難しいという問題がある。この問題に対し、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) の創出を提案してきた。現在までに、ワイドギャップ強誘電体 VDF-TrFE をゲートとした MFS 型ダイヤモンド FET を開発し、室温における電流 on/off 比 10⁸、最大電流密度 265mA/mm を達成し、FeFET 構造を利用した高効率キャリア誘起を実現した[2,3]。また、VDF-TrFE の残留分極を利用したダイヤモンド FeFET の疑似ノーマリオフ動作を実証した[4]。

一方、上記ダイヤモンド FeFET における強誘電体ゲートを構成する VDF-TrFE は有機物であり、高温・放射線耐性を兼ね備えたデバイスの実現は容易ではない。そこで、本研究では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、その放射線耐性に関する検証を網羅的に行う事を目指す。

本提案は、材料とデバイス構造の両面から超高機能パワーFET の創出に挑むものの、複数材料を融合

したパワーFET に対し、その優位性について材料・デバイスの両面から科学的に検証した報告は無く、推測の域を超える明確な開発指針は分かってない。

そこで、本研究課題では、「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目的とする研究を実施する。具体的には、ワイドギャップ半導体 ZnO と無機強誘電体 Pb(Zr,Ti)O₃ (PZT) を用いた FeFET 構造に関し、異なるゲート構造作製法で作製した試料に対するガンマ線照射前後での各種デバイス特性を評価し、当該デバイス構造におけるガンマ線照射による特性劣化の有無および劣化に対する主な要因の特定を検証した。

2. 実験方法

2.1 試験試料の作製

ガンマ線照射を行う試料として、バックゲート型 ZnO チャネル FeFET を作製した。その際、強誘電体ゲート部に用いる PZT 薄膜について、ガンマ線照射による変性・劣化の有無を検証する事を目的とし、2種の成膜法を用いて堆積した。1種目として Pt/SiO₂/Si 基板上に Chemical Solution Deposition (CSD) 法を用いて、2種目として下部電極として用いる SrRuO₃ 薄膜をエピ成長させた (100)SrTiO₃ 基板上に Pulsed Laser Deposition (PLD) 法を用いて PZT を堆積させた[5,6]。これら 2種の成膜法は本質的に「大気圧環境下で比較的マイルドに結晶化を促す (CSD) 手法」と「減圧雰囲気下でエピ成長させる (PLD) 手法」であり、形成した PZT ゲートの結晶性に対して意図的に差異を与える事を目的として選択した[7,8]。その後、PLD 法を用いてチャネル層としてアモルファス Al 添加 ZnO (Al-ZnO) を室温で堆積した。最後に、PLD 法を用いて Ni、Pt を堆積させ、ソース・ドレイン電極を作製した。また、各試料の同一基板上

[20013]

にゲート PZT の特性検証用に強誘電体キャパシタを形成した。作製した試料構造の概要を図 1 に記す。

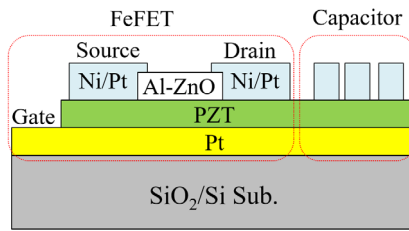


Figure 1. Schematic image of prepared specimen.

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・食品棟 2 セルにおいて、照射強度 2~20Gy/h、照射時間 1 時間の条件でガンマ線照射を行った。試料の評価として、ガンマ線照射前後における FeFET の I_D - V_D 、 I_D - V_G 、P-V 特性の評価を行った。

3. 結果と考察

3.1 FeFET の I_D - V_D 特性の変化

作製した試料はいずれも n チャネル型 FeFET として明瞭な動作を示す事を確認した。また、同一基板上に作製した PZT キャパシタも良好な強誘電性を示した。

図 2 に PLD および CSD を用いて PZT ゲートを作製した FeFET に対する照射強度 20Gy/h のガンマ線照射前後における I_D - V_D 特性を記す。両試料において、ガンマ線照射により I_D の低下が確認された。また、CSD でゲートを作製した試料に対し、より大きな I_D の低下が見られた事に関しては、CSD で堆積した PZT 薄膜に多く含まれるアモルファス成分がガンマ線照射によって Al-ZnO チャネル側に熱拡散され、チャネルのキャリア移動度が低下した事が要因の一つとして考えられる。これに対し、PLD は高エネルギー粒子を減圧雰囲気下で堆積させる手法であることから、作製された PZT 薄膜がより緻密かつアモルファス成分が相対的に僅かである事により、Al-ZnO チャネルへの元素拡散が相対的に少なかったものと考えられる。

また、ガンマ線照射に伴う V_D : 2V 未満のオーミック領域における負性抵抗成分や大幅な傾きの変化は両試料ともに見られない事から Al-ZnO と Source/Drain 電極間における抵抗成分の増大やショットキー障壁の形成といった電極部における劣化は

生じていない事が分かる。

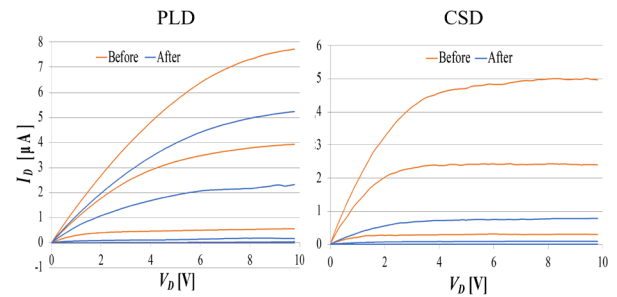


Figure 2. I_D - V_D curves before/after of Γ -ray irradiation.

3.2 FeFET の I_D - V_G 特性の変化

図 3 に同試料に対する照射強度 20Gy/h のガンマ線照射前後における I_D - V_G 特性を記す。ガンマ線照射前後における変化として、「飽和電流の低下」、「特性カーブの正バイアス側へのシフト (V_{th} シフト)」が確認された。飽和電流の減少に関して、その要因として(1)Al-ZnO チャネルの劣化と(2)PZT ゲートの分極誘起能の低下が要因として挙げられる。また、 V_{th} シフトに関して、オン/オフ電流が切り替わる閾値電圧 (= PZT の抗電圧) の顕著な増加を伴っていない事から PZT 中の分極ドメイン反転に対するピンングセンタの増加は考えにくい。主な原因として、(1)に関連する Al-ZnO と PZT の界面に生じた界面準位が考えられる。

一方、オフ電流の増加は両試料ともに生じておらず、PZT の絶縁性は保持されている事が分かる。

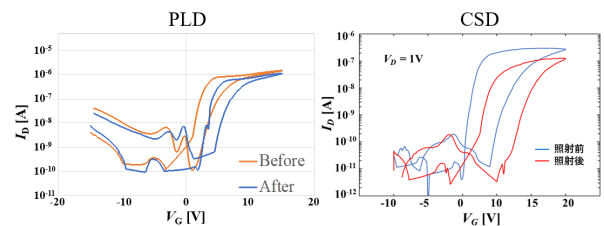


Figure 3. I_D - V_G curves before/after of Γ -ray irradiation.

3.3 PZT キャパシタの P-V 特性の変化

図 4 に同試料の PZT キャパシタに対する照射強度 20Gy/h のガンマ線照射前後における P-V 特性を記す。両試料に共通の振る舞いとして、絶縁性低下に伴う P-V 特性が丸みを帯びるといった変化、飽和分極値および残留分極値の低下といった PZT の分極誘起能の劣化は生じていない事が分かる。

一方、PLD で作製した試料についてのみ観測された振る舞いとして、抗電圧 $2V_c$ の増加が見られた。PLD 試料でのみ観測された $2V_c$ の増加に関して、可能性として挙げられる事項として、ガンマ線照射により PZT 中に酸素欠損などが形成され、それらが分

[20013]

極ドメイン反転に対するピンングセンタとなった事が示唆される。同様の振る舞いが CSD 試料で観測されなかった理由としては、CSD 試料はアモルファス成分を多く含む事から「仮にガンマ線照射による酸素欠損が生じて、周辺に存在する自由度の高いアモルファス成分が欠損成分を補填した」可能性が考えられる。

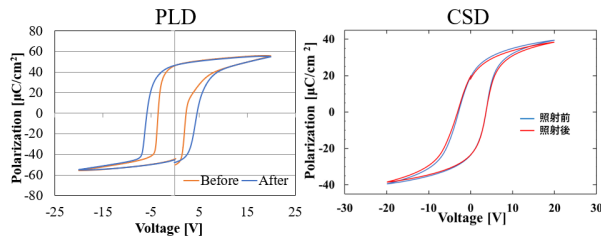


Figure 4. P-V curves before/after of Γ -ray irradiation.

3.4 確認された劣化事項の主因と対策

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 20Gy のガンマ線照射に対し、作製した Al-ZnO チャネル FeFET における劣化現象として、(1) Al-ZnO チャネルの導電性低下、(2) V_{th} シフトが確認された。一方、(1') Al-ZnO と Source/Drain 電極界面、(2') PZT ゲートの絶縁性・強誘電性に関する致命的な劣化は確認されなかった。以上の事より、Al-ZnO チャネルと PZT 界面における元素拡散により、「Al-ZnO の移動度低下」、「界面準位の形成」がガンマ線照射に対する主な劣化と考えられる。

確認された劣化現象を回避し、本研究課題で目標として挙げる「過酷環境で動作可能なパワー FeFET」を実現するには、チャネル-強誘電体ゲート界面での元素拡散現象の抑制が早急に解決すべき課題である事が明らかになった。当該事象に対する解決策として、(A)界面部にバリア層を導入する、(B)予め熱履歴を与えるプロセスを実施するといった方法が挙げられる。(A)に関しては、ダイヤモンド ($E_g = 5.47\text{eV}$) と無機強誘電体 ($E_g = 3\text{--}4\text{eV}$) 間でのバンドオフセット確保を目的とした絶縁層 (SiO_2 もしくは Al_2O_3) 導入により解決されると推察される[9,10]。また、(B)については、ガンマ線照射による熱拡散が主要因と考えられる事から、熱拡散する可能性がある自由度の高いアモルファス成分や C などの軽元素を予めフォーム処理で固定化するプロセスが有効であるものと考えられる。

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、PZT をゲートとした Al-ZnO チャネル FeFET に対するガンマ線照射実験を行った。

トータルドーズ量 20Gy 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（特にノーマリオフ動作に影響を与える）に対して懸念されるゲート部の絶縁性や分極誘起能の低下は見られなかった。

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が示唆される結果が得られたものと考えられる。

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] Y. Nishitani, *et al.*, J. Appl. Phys. **111**, 124108 (2012)
- [6] R. Seveno, *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. **50** 165502 (2017)
- [7] レーザーアブレーションとその産業応用調査専門委員会編、レーザーアブレーションとその応用、コロナ社
- [8] 作花済夫、ゾル-ゲル法応用の展開、シーエムシー出版
- [9] W. Fei, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **116**, 212103 (2020)
- [10] N. Oi, *et al.*, Sci. Rep. **8**, 10660 (2018)