

[課題番号] 22019

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

Au/Pb(Zr,Ti)O₃/Al₂O₃/p⁻diamond layered films were deposited on the (111) diamond substrates, resulting in the metal-ferroelectric-insulator-semiconductor (MFIS) capacitor structure. Polycrystalline Pb(Zr,Ti)O₃ films were grown on the Al₂O₃ barrier layer without impurity phases. Comparing the capacitance vs voltage (*C-V*) curves of the MFIS and MIS capacitor structure, the Al₂O₃ barrier layer includes the charge trapping site, resulting in the both capacitor structure showing counterclockwise *C-V* hysteresis. Post deposition annealing treatment reduce the amount of formed charge trap sites in the Al₂O₃ barrier layer due to reduction of H₂O in the MIS structure.

Keyword: wide-gap semiconductor, ferroelectric gate, field effect transistor, interface

1. はじめに

近年、宇宙機器産業の推進・育成が我が国のみならず、世界各国の重要技術戦略の一つに掲げられている[1,2]。宇宙空間において電気機器を利用する際、供給手段（主に太陽光発電など）が著しく制限される電気エネルギーを低損失かつ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。さらに、宇宙空間は放射線や熱線に常に晒される極めて過酷な環境であり、宇宙空間で用いられる電気機器類に対しては長期にわたる安定動作が絶対的な条件として求められる[3]。

また、我が国の喫緊の課題である福島第一原発の廃炉作業について、凄惨な事故から10年超を経て明らかにされた各所の破損状況に対し、様々な技術・アプローチによる復旧が模索されている。特に飛散した放射性廃棄物が放つ強い放射線環境下における無人作業は必須要件であり、作業を進めるための各種ロボット・計測機の駆動に關与する電気機器類に対して「高強度放射線下における長期的な安定動作」が求められる。このことから、上述の宇宙空間で利用される電気機器と同様に、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) 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強誘電体ゲートの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[4-7]。一方、有機物である VDF-TrFE は高温動作・放射線耐性を有していないことから、無機強誘電体をゲートとしたダイヤモンド FeFET の創出と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。

これまでに予備的な検討として、強誘電体

Pb(Zr,Ti)O₃ (PZT) をゲート、ワイドギャップ半導体 ZnO をチャンネルとした FeFET を用いて、ガンマ線照射に対して同デバイス構造におけるチャンネル-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[8,9]。さらに、Au/PZT/Al₂O₃/p⁻ダイヤモンドで構成する MFIS 型ゲートおよび p⁻ダイヤモンドチャンネルに関して、トータルドーズ量 15.4[kGy]のガンマ線照射に対する Al₂O₃ バリア層の優れた絶縁性の保持と界面における元素拡散抑制の効果を明らかにした。また、p⁻ダイヤモンドチャンネルの高いガンマ線照射耐性を確認した[10]。

前年度までの研究遂行を通して得た知見に基づき、本研究課題では「ダイヤモンド FeFET の基幹部となる MFIS 型ゲート構造の最適化」を中心に据える検討を行った。具体的には、MFIS 型ゲート構造中の Al₂O₃/p⁻ダイヤモンド界面に関して、強誘電体層の残留分極を電氣的に打ち消してしまう電荷トラップ成分の低減策を調査した。特に、当該デバイス構造への長期にわたるガンマ線照射を念頭に置いた、界面部における欠陥・混入成分に対する回復・除去に関する検証を行った。

2. 実験方法

MFIS ゲート構造として、コンタクト用の p⁺ダイヤモンド (B 濃度: 10²⁰[cm⁻³]) を MPCVD 法でホモエピ成長させた(111)ダイヤモンド基板上に、Au/PZT/Al₂O₃/p⁻ダイヤモンド積層構造を作製した。Au は真空蒸着法、PZT は CSD 法、Al₂O₃ はサーマル ALD 法を用いて堆積した。また、p⁻ダイヤモンド (B 濃度: 10¹⁷[cm⁻³]) は MPCVD 法を用いて p⁺ダイヤモンド層上にホモエピ成長させた。

Al₂O₃ 層の ALD 堆積にあたり、前年度の研究遂行を通して「高強度ガンマ線照射に対する、絶縁性の保持と元素拡散抑制」の効果が明らかにされた事か

[課題番号]22019

ら、300°Cのサーマル ALD による Al₂O₃ 層の堆積を行った。また、MFIS 構造中の直列キャパシタ成分である PZT 層に対する印加電圧の分圧を考慮し、Al₂O₃ 層の厚さは 5[nm]とした。なお、Al₂O₃ 層のサーマル ALD 堆積直前のダイヤモンド基板に対して、基板表面を OH 終端化させるウェットアニール処理 (500°C, 1h) を行った[5,11]。

3. 結果と考察

3.1 MFIS 構造の基礎特性の評価

図 1 に示す PZT/Al₂O₃/p-ダイヤモンド構造に対する XRD 測定結果より、Al₂O₃/p-ダイヤモンド上において PZT がランダム配向で結晶化した事を確認した。

Au 上部電極を形成した試料に対し、*P-V* および *C-V* 測定を行った結果を図 2 に示す。*P-V* 特性から蓄積領域 (負バイアス域) における明瞭な強誘電性が確認された。一方、*C-V* 特性において、電荷トラップ型のヒステリシス特性 (電圧スイープに対する反時計回り) が観測された。この結果は Al₂O₃ 層内部の電荷トラップ層 (主に酸素欠損に由来する AlO_x 成分) の存在を強く示唆するものと言える[12,13]。

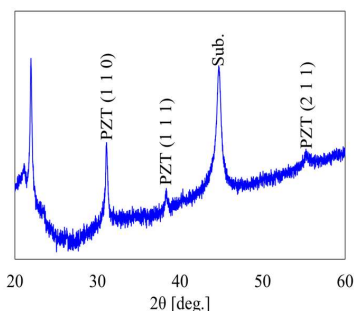


Figure 1. XRD pattern of PZT/Al₂O₃/p-diamond layered structure on (111) diamond substrates.

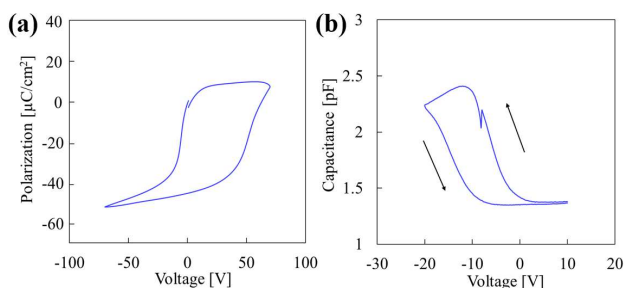


Figure 2. (a) *P-V* and (b) *C-V* curves of prepared MFIS structure.

そこで、AlO_x 成分の低減を目的に、PZT/Al₂O₃/p-ダイヤモンド構造に対する PDA (Post Deposition Annealing) 処理を行った。ここで PDA 条件として、ダイヤモンド界面の保護と AlO_x の酸素欠損解消を念頭にウェットアニール処理を選択した。図 3 に PDA 処理を施した試料の *P-V* および *C-V* 特性を示す。観測された *P-V* 特性から、PDA 処理により強誘

電性は失われていない事が分かる。さらに、*C-V* 特性において強誘電性由来のヒステリシス特性 (電圧スイープに対する時計回り) が確認された。一方、蓄積領域において容量の低下が見られ、PDA 処理に伴う MFIS 構造のリーク電流増加が懸念される。

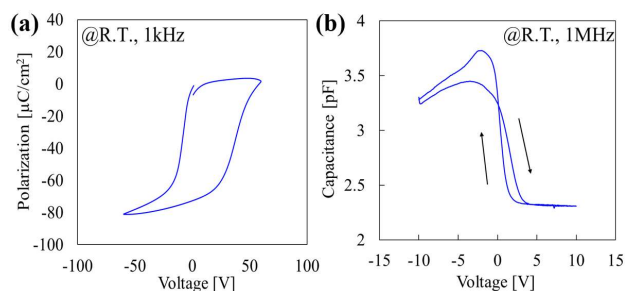


Figure 3. (a) *P-V* and (b) *C-V* curves of prepared MFIS structure with PDA treatment.

3.2 MIS 構造に対する PDA 処理条件の最適化

MFIS 構造において電荷トラップ層として機能する Al₂O₃ 層中の AlO_x 成分に対し、その低減にウェットアニールを用いた PDA 処理が有効である可能性を確認した。一方、理想的な MFIS 構造の特性を獲得するには至っていない事から、MIS 構造に対する PDA 処理条件の最適化を検討した。ここで、電荷トラップ層の多寡のみについて議論する事を念頭に、Al₂O₃ 層の厚さは 15[nm]とした。

図 4(a)に Al₂O₃ 層堆積後に 300°C、1h の PDA 処理を行った試料の *C-V* 特性を示す。PDA 処理によりヒステリシス幅が低下している事、即ち、電荷トラップ成分の起源である AlO_x 成分が減少している事が分かる。図 4(b)に PDA 処理温度および時間に対する、各試料の *C-V* 特性で観測されるヒステリシス幅の変化を記す。PDA 処理温度と時間が増す事によりヒステリシス幅が増加する傾向が確認された。以上の結果より、ウェットアニールによる PDA 処理は AlO_x 成分の低減に効果があるものの、過剰な H₂O 成分の導入は電荷トラップ成分の増加を招く事が推察される。

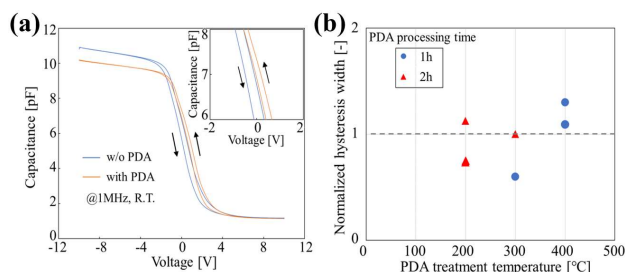


Figure 4. (a) *C-V* curves of diamond MIS structure with and w/o PDA treatment. (b) PDA condition dependence of normalized hysteresis width of MIS structure.

[課題番号]22019

3.3 MIS 構造における H₂O 成分と電荷トラップ（ヒステリシス）の相関

ウェットアニールに伴う Al₂O₃ 層中の H₂O 成分と電荷トラップの相関を検証する事を目的とし、

(1) Al₂O₃ 堆積直後に Au 上部電極を形成 (PDA 処理無し)

(2) (1)の試料を大気中で 3 日間放置

(3) (2)の試料に対し、真空中で 400°C、1h アニールの 3 種の試料に対する C-V 特性の比較を行った。ここで、MIS 構造中に混入・存在すると想定される H₂O 成分として、(1')サーマル ALD プロセスでリアクタントとして用いた H₂O、(2')大気中に存在する H₂O を想定する。

図 5(a)に示す結果より、Al₂O₃ 堆積直後の as-grown 試料は僅かにヒステリシスを示すが、大気中に長時間放置する事により更にヒステリシス幅が増加する事が分かる。一方、図 5(b)に示すように真空アニールを施す事により、ヒステリシス幅が大幅に低減する事が確認された。さらに、as-grown 試料と真空アニール試料を比較すると、as-grown 試料で観測されたヒステリシス幅を下回る結果となった(図 5(c))。

以上の結果から、「MIS 構造の Al₂O₃ 層中に存在する H₂O が電荷トラップを引き起こす要因」であり、「H₂O は Al₂O₃ 層中で固定されておらず、比較的、位置の自由度が高い状態で存在」している可能性が示唆される[14]。

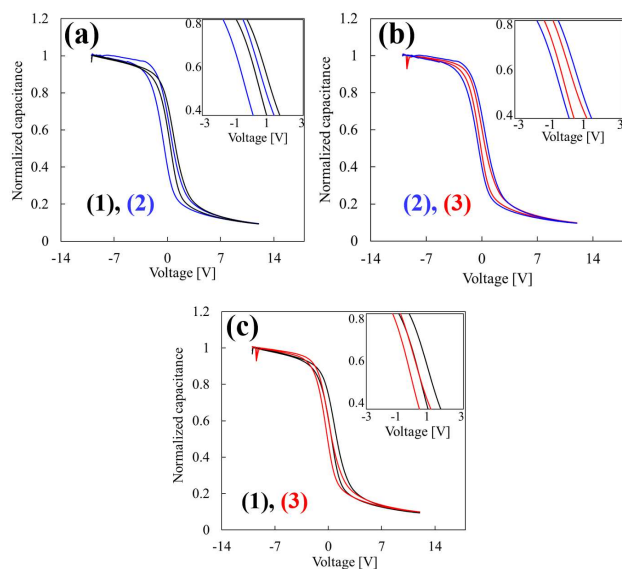


Figure 5. C-V curves of diamond MIS structure, (a) as-grown, (b) left in air for 3 days, and (c) vacuum annealed.

一方、図 5(c)に示すように真空アニール処理を用いても電荷トラップ成分を完全に除去するまでには至っていないものの、よりハードな条件の真空アニール処理は Al₂O₃/p-ダイヤモンド界面の劣化 (Al-O-C 結合の切断など) も懸念される。さらに、3.1 および 3.2 で示した結果を踏まえると、「ウェットアニールを用いた AlO_x 成分の低減」と「真空アニールによ

る過剰な H₂O 成分の除去」を指向した複合 PDA 処理が理想的な MIS 構造の実現に効果的であると考えられる。

4. まとめ

過酷環境下における安定動作と低損失動作の両立を指向したダイヤモンド FeFET の創出を目指し、MFIS 型ゲート構造部における理想的な動作を阻害する要因の特定と対応策を検証した。

MFIS 型ゲート構造の Al₂O₃ 層中に AlO_x と推測される電荷トラップ成分の存在とその対処法として PDA 処理が有効である事が明らかにされた。また、前年度までに明らかにされた高強度ガンマ線照射に対する MFIS ゲート構造およびダイヤモンドチャネルの優れた耐性を踏まえ、過酷環境下におけるダイヤモンド FeFET のデバイス特性に関する早期の検証が求められる。

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] 内閣府・宇宙開発戦略本部、宇宙基本計画 (2023)
https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei_fy05/honbun_fy05.pdf
- [3] 廣瀬和之、ISAS ニュース, No484, (2021)
https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews484.pdf
- [4] T. Kawae, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **108**, 242101 (2016)
- [5] R. Karaya, *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **56**, 10PF06 (2017)
- [6] T. Kawae, *et al.*, International Workshop on Plasma Technology for Diamond Growth and Diamond Device Fabrication (2019)
- [7] T. Kawae, 4th International Seminar on Metallurgy and Materials (2020)
- [8] 玉村達哉、金沢大学大学院自然科学研究科 修士論文 (2021)
- [9] T. Kawae, *et al.*, QST Takasaki Ann. Rep. 2020, QST-M-33, 35 (2021)
- [10] T. Kawae, *et al.*, QST Takasaki Ann. Rep. 2021, QST-M-39, 43 (2022)
- [11] T. Matsumoto, *et al.*, Sci. Rep. **6**, 31585 (2016)
- [12] T. Kawae, *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 04CH03 (2013)
- [13] S. Ozaki, *et al.*, J. Vac. Sci. Tech. B **32**, 031213 (2014)
- [14] K. Takahashi, *et al.*, The 9th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (2023)