

炭化ケイ素半導体を用いた超耐放射線性エレクトロニクスの開発

受託者 国立大学法人埼玉大学
研究代表者 土方 泰斗 大学院理工学研究科
再委託先 独立行政法人日本原子力研究開発機構、サンケン電気株式会社
研究開発期間 平成25年度～27年度

1. 研究の背景とねらい

東電福島第一原発の廃炉措置においては高線量環境場での作業が必須であり、人間の被ばくを低減するためにもロボット等の使用は不可避である。しかし、従来のロボットやセンサ等に搭載されているシリコン (Si) 半導体デバイスでは耐放射線性が不十分である。例えば、事故後に福島第一原発2号機・格納容器内で観測された毎時70シーベルトといった環境では⁽¹⁾、耐放射線性を強化したSiデバイスをを用いたとしても、たった一日の使用で動作不良に陥ると試算される。加えて、東電福島第一原発の圧力容器内等の実環境を考えると、高放射線量だけでなく温度や湿度といった複合環境下における耐性も強化されなければならない。炭化ケイ素(SiC)半導体素子は、従来用いられてきたSi半導体素子と比べ高い耐放射線性を有し⁽²⁾、このようなロボットへの応用が期待されている。また、SiCは現在主流であるSi半導体素子に比べ、熱伝導度が約3倍、絶縁破壊電界が約10倍とパワーデバイスとして優れた物性値を有する。このため、同耐圧素子のオン抵抗値はSi素子の数100分の1に低減できる⁽³⁾。さらに、熱酸化により酸化膜(SiO₂)を表面に形成でき、Metal-Oxide-Semiconductor (MOS) 構造の作製が容易である。よって、SiC素子の採用は、耐放射線・低損失半導体材料として有力視されている。

本研究では、強い放射線環境場での長時間作業を可能にするロボットやセンサシステムの開発に必須となる「超耐放射線性エレクトロニクス」を実現するため、炭化ケイ素 (SiC) 半導体を用いた金属-酸化膜-半導体 (MOS) 電界効果トランジスタ (FET) の耐放射線性能を数MGyレベルにまで引き上げ、放射線場だけでなく温度や湿度も考慮した複合環境下においても動作可能な超耐性ならびに高信頼性技術の開発を行うと共に、開発したデバイスを用いて電力制御回路を試作し、その耐放射線性を回路レベルで検証することを目的とする。

2. これまでの研究成果

初年度であるH25年度において、SiCパワーデバイスの室温及び高温での電気特性の把握、室温・大気雰囲気といった標準的な条件でのガンマ線照射による特性変化を把握し、H26年度以降の本格的なガンマ線照射試験に向けての複合環境下でのガンマ線照射技術の開発や各種評価装置の整備を行った。また、結晶損傷のガンマ線照射による影響を明らかにするため、フォトルミネッセンス (PL) /ラマンイメージングを照射前後で行い、結晶欠陥の変化の様子を観察した。H26年度より、照射後アニールの効果検証、デバイス構造・作製プロセスの変更、複合環境下 (ガンマ線照射+バイアス電圧印加、+加熱) での試験に着手し、デバイス劣化機構解明に向けた実験を展開した。

2.1 実験について

ガンマ線照射実験および特性回復観測のための試料として、T03Pパッケージに実装された耐圧1200Vの縦型4H-SiC MOSFET (サンケン電気製) を使用した。ゲート酸化膜はドライ酸化及び酸化後N₂O処理により作製し、酸化膜厚を45nmとした。比較のために、SiC MOSFETと同等の定格

電流を持つ T0220 パッケージに実装された耐圧 250 V の縦型 Si MOSFET に対する実験も行った。Si MOSFET のゲート酸化膜はパイロジェニック酸化により作製され、酸化膜厚は 150 nm である。これら試料に対し室温、 N_2 雰囲気中において、バイアス印加なしでコバルト 60 からのガンマ線を 3.6 kGy/h の線量率で照射した。電気特性の測定は Semiconductor Parameter Analyzer (Agilent Technologies 製 4156A) を用いて室温にて行った。

PL イメージング測定を、波長 325 nm の He-Cd レーザーを励起源として室温で行った。測定は SiC ウェハ上の MOSFET を溶液除去した後に行い、未照射の試料とガンマ線照射後（最大 11 MGy (SiO_2 ））とを比較検討した。PL 光は、ロングパスフィルタ (>700 nm) を用いて分光し、高感度 CCD カメラで撮像した。

2.2 実験結果及び考察

図 1 左に、様々な吸収線量での Si-MOS キャパシタに対する高周波 $C-V$ 特性を示す。吸収線量増加に伴い、 $C-V$ 曲線が負電圧側に大きくシフトし、フラットバンド電圧付近での傾きが減少した。 $C-V$ 曲線が負電圧側にシフトするのは、正の酸化膜固定電荷が導入されるために起こり、それによって酸化膜内に正の電界が発生するためである⁽⁴⁾。また、界面準位密度が増大することによって、容量値に応じた応答信号の振幅が縮小し、その結果 $C-V$ 曲線の傾きが減少する。図から吸収線量増加に伴い酸化膜固定電荷と界面準位密度が増加したことが示唆される。図 1 右は SiC-MOS キャパシタにおける高周波 $C-V$ 測定の結果である。照射初期 (8.7~100 kGy (SiO_2)) に、 $C-V$ 曲線が負電圧側にシフトし、その後は 1~8.5 MGy (SiO_2) にかけて $C-V$ 曲線の揺り戻し (正電圧側へのシフト) が起きた。ガンマ線起因の酸化膜固定電荷は正電荷に限られるため、これは応答の遅い界面準位に電子がトラップされ、酸化膜固定電荷のように振る舞ったためと説明できる⁽⁵⁾。Si-MOS キャパシタに比べると、SiC-MOS キャパシタへのガンマ線照射の影響は極めて小さいことがわかった。

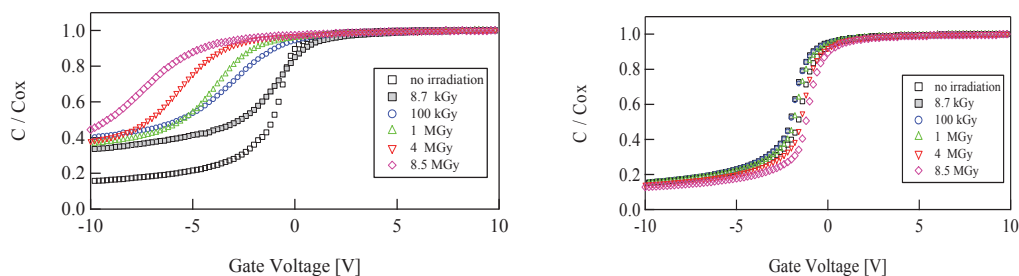


図 1. MOS キャパシタ $C-V$ 特性の吸収線量依存性 (左: Si, 右: SiC)

図 2 に今回試験した SiC-及び Si-MOSFET の I_d-V_g 特性の吸収線量依存性を示す ($V_d=10$ V)。図より、Si の I_d-V_g 曲線は大きく負電圧側にシフトすると共に、傾きが緩やかになった。一方、SiC の場合、負電圧側へのシフトはかなり抑制され、傾きの鈍化も見られなかった。なお、負電圧側へのシフトと傾きの鈍化はそれぞれ、MOSFET のゲート酸化膜における正の酸化膜固定電荷の生成と界面準位の増加に対応する⁽⁶⁾。図 3 は、しきい値電圧のシフト幅 (ΔV_{th}) 及び応答速度 (S factor) の吸収線量依存性を示す。なお、 ΔV_{th} は酸化膜固定電荷量に負比例し、 S factor は界面準位密度に比例する (値が小さい方が有利)。図より、今回の試作機において、SiC-MOSFET は Si よりも極めて優れたガンマ線耐性を有すると言える。図 2 及び 3 の結果から、ガンマ線照射によって正の酸化膜固定電荷は SiC 及び Si に関わらず生成するが、SiC-MOSFET においては主要な劣化部位であり、これさえ抑制すればガンマ線耐性の向上に結び付くことを突き止めた。

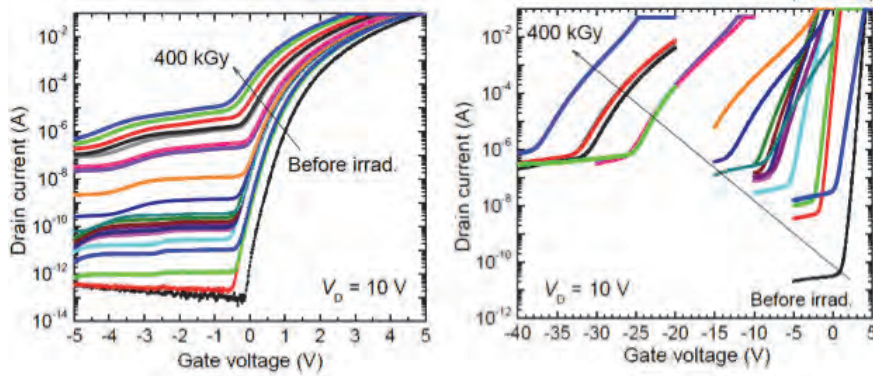


図 2. MOSFET サブスレッショルド領域の吸収線量依存性 (左: Si, 右: SiC)

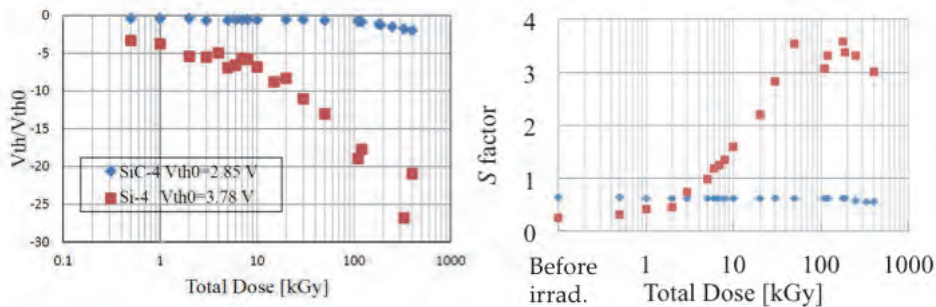


図 3. しきい値電圧のシフト幅 ΔV_{th} (左) および S factor (右) の吸収線量依存

次に、SiC 及び Si-MOSFET に対し総線量 1.2 MGy のガンマ線を照射し、その後加熱を行い、劣化した MOSFET へのアニール効果を調べた。アニールプロセスとして、240 時間の室温アニールをまず行い、40°C から 20°C ステップで各ステップ 20 分間、360°C まで行った。室温アニール後、Si では室温でも劣化回復が大きく見られたが、SiC ではほとんど変動が無かった。図 4 は、しきい値電圧のシフト幅 (ΔV_{th}) 及び応答速度 (S factor) のアニール温度依存を示す。 ΔV_{th} については、Si 及び SiC-MOSFET の両方において 100°C 付近から劣化の回復が始まり、温度上昇と共に回復が進み、360°C においてはほぼ照射前のしきい値電圧まで回復することが分かった。また、 S factor については、Si では照射で大きく劣化し、180°C でほぼ照射前の値に回復した。一方、SiC の場合、照射による劣化がほとんど見られず、その結果アニールによる変化もほとんどなかった。

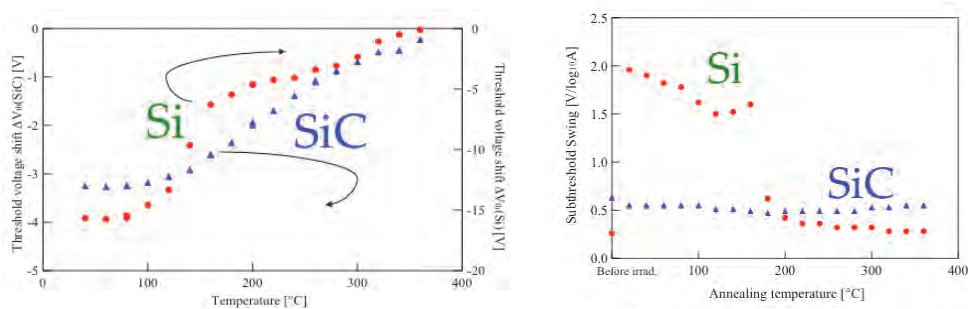


図 4. しきい値電圧のシフト幅 ΔV_{th} (左) および S factor (右) の照射後アニール温度依存

図 5 に、MOSFET 除去後の SiC 基板に対しガンマ線照射を行い、照射前後で取得した PL イメージを示す。照射前は基底面転位 (楕円囲み)⁽⁷⁾ が無数見られるが、1MGy の照射でほぼ消失していることがわかる。また、バルク/エピタキシャル膜界面における界面欠陥 (四角囲み) も見られるが、これも 11 MGy の照射でほぼ消失されることがわかった。特に基底面転位は順方向電流劣化をもたらすデバイスキラーク欠陥であるので⁽⁸⁾、これが消失されるという実験事実は通常のパワーデ

バイス開発に対しても有益な情報と成り得る。

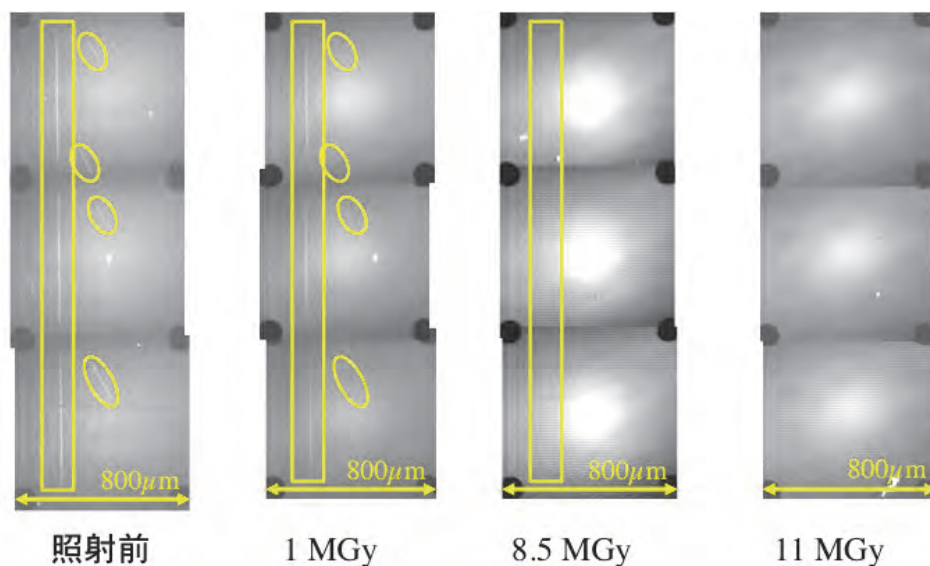


図 5. ガンマ線照射前後における PL イメージ：ロングパスフィルター(>700nm)使用

3. 今後の研究

現在進行している研究課題は以下の通りである：複合環境下ガンマ線耐性評価として、1) 150°C 加熱下、2) バイアス電圧印加下、での照射試験を実施している。また、デバイス構造・作製プロセスの最適化として、3) 酸化膜厚を変えてのガンマ線耐性の比較、4) 界面窒化処理の異なる酸化膜の比較を行っている。また、SiC デバイス領域におけるガンマ線照射及び顕微 PL/ラマンイメージングによる結晶ダメージ観察もより詳細に行っている。一方、モータドライブ用三相ブリッジ回路を SiC デバイスによって作製し、ガンマ線照射実験による 1MGy 耐性検証も現在行っているところである。

4. 参考文献

- (1) 日本経済新聞社, http://www.nikkei.com/article/DGXNASDG27040_X20C12A3000000/?dg=1
- (2) Ohshima, T., et al., “Radiation Response of Silicon Carbide Diodes and Transistors,” in “Physics and Technology of Silicon Carbide Devices,” edited by Y. Hijikata, InTech, Croatia (2012).
- (3) 荒井和雄・吉田貞史, “SiC 素子の基礎と応用,” 第 4 章, p. 141, オーム社 (2003).
- (4) Nicollian, E. H. and Brews, J. R., “MOS Physics and Technology,” Chap. 11, p. 549, Wiley Inter-Science (2003).
- (5) Yoshikawa, M., et al., “Depth profile of trapped charges in oxide layer of 6H-SiC metal-oxide-semiconductor structures,” *Journal of Applied Physics* vol. 80, p. 282 (1996).
- (6) Akturk, A., et al., “Radiation Effects in Commercial 1200 V 24 A Silicon Carbide Power MOSFETs,” *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, vol. 59, no. 6, pp. 3258–3264 (2012).
- (7) Nagano, M., et al., “Plan-View and Cross-Sectional Photoluminescence Imaging Analyses of Threading Dislocations in 4H-SiC Epilayers,” *Japanese Journal of Applied Physics* vol. 52, a. n. 04CP09 (2013).
- (8) Nakayama, K., et al., “Drift Phenomena of Forward and Reverse Recovery Characteristics in 0001 4H-SiC p-i-n Diode,” *Japanese Journal of Applied Physics* vol. 50, a. n. 04DF04 (2011).