

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。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⁽¹⁾。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⁾。

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、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

第二カ年度であるH26年度までに、SiCパワーMOSFETに対する複合環境下(ガンマ線照射+バイアス電圧印加、+加熱)でのガンマ線照射による特性変化を把握し、素子劣化メカニズム解明に資する情報を得た。また、ガンマ線照射による結晶損傷の影響を明らかにするため、フォトルミネッセンス(PL)イメージングを行った。最終年度であるH27年度には、複合環境下における照射試験を引き続き行うと共に、高湿下というより実環境に近い環境を与え、照射試験を再開した。また、PLイメージングに加え、Deep Level Transient Spectroscopy(DLTS)をガンマ線照射前後で行い、結晶欠陥の変化の様子をより詳しく観察した。

2.1 実験について

ガンマ線照射実験の試料には、T03Pパッケージに実装された耐圧1.2kV、定格電流20A、オン抵抗100mΩ($V_g = 20V$)、酸化膜厚45nm(乾燥酸素中(Dry)酸化+ N_2O 処理)のサンケン電気製nチャンネル4H-SiC MOSFETを用いた。複合環境下ガンマ線耐性評価として1) 150°C加熱下、2) 150°C加熱+加湿下、3) 室温±4.5Vバイアス電圧印加下で、線量率3.61kGy(SiO_2)/hのCo-60ガンマ線を試料に照射した。試料の加熱は照射容器付属のヒーターで行い、さらに加湿雰囲気下の照射は、加湿器で発生させた吐出圧力約0.2MPaの高圧水蒸気により照射容器内を相対湿度100%に保持して行った。比較のため1)、2)については、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250V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150nmである。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 ウエハ上の 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 1 MGy (SiO₂)）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。Deep level transient spectroscopy (DLTS) 測定も同様に先行し、前出 MOSFET と同じウエハに作製された Test element group (TEG) 内の n 型 MOS キャパシタを用いた。

6 つの SiC-MOSFET を用いて 3 相インバータ回路を作製し、ゲートに印加する PWM 信号の周波数を 10kHz と設定した。負荷として 26W、定格電流 1.425A のモータを接続した。また、モータ駆動電流の周波数を 30Hz とした。各試料に対しガンマ線が均一に照射されるよう MOSFET を直線状に配置し、SiC-MOSFET 系回路（三相ブリッジ）以外の回路系は全てガンマ線源から離し、鉛ブロックで遮へいした。

2.2 実験結果及び考察

図 1 に、今回試験した SiC-及び Si-MOSFET の 150°C 加熱+加湿下におけるドレイン電流-ゲート電圧 (I_d - V_g) 特性の吸収線量依存性を示す ($V_d=10$ V)。左図より、Si の I_d - V_g 曲線は大きく負電圧側にシフトした。一方 SiC の場合、負電圧側へのシフトが抑制され、さらに SiC の室温照射の場合と比較してもかなり劣化が抑制された。加えて、水分の存在によって SiC-MOSFET のリーク電流（負ゲート電圧下での I_d ）の増加が大幅に抑制されることから、加湿下における SiC-MOSFET の優れたガンマ線耐性を確認できた。

MOSFET の劣化要因の 1 つである負電圧側へのシフトは、ゲート酸化膜における正の酸化膜固定電荷の生成に対応する⁽⁴⁾。図 2 は、150°C 加熱下でのガンマ線照射におけるしきい値電圧のシフト幅 (ΔV_{th}) の吸収線量依存性を示す。同図より、高温下において 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。また、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、吸収線量が増加しても ΔV_{th} がほぼ一定値にとどまることから、高温加熱によって正の酸化膜固定電荷が除去されることを突き止めた^(5,6)。

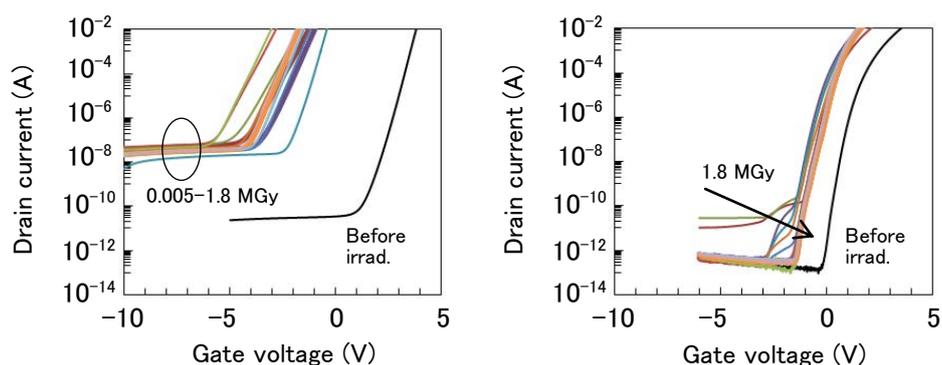


図 1. 150°C 加熱+加湿下における MOSFET サブスレッショルド領域の吸収線量依存 (左: Si, 右: SiC)

図 3 に、室温バイアス電圧印加下における SiC-MOSFET の I_d - V_g 特性の吸収線量依存性を示す ($V_d=10$ V)。同図左より、正バイアスの I_d - V_g 曲線は大きく負電圧側にシフトした後、200kGy 以降は正電圧側にシフトした。一方負バイアス印加下では (図 3 右)、負電圧側へのシフトが抑制された。負電圧側へのシフトは酸化膜固定電荷の生成に、正電圧側へのシフトは SiC-ゲート酸化膜における界面準位の生成に対応する⁽⁴⁾。図 3 の結果から、正バイアス電圧印加下では、正の酸化膜

固定電荷による負方向シフトが支配的であるが、高線量域では界面準位生成による負電荷によってシフトが引き戻される。他方、負バイアス電圧印加下では、正の酸化膜固定電荷の生成がバイアス印加により抑制されるため、十分なガンマ線耐性を確保できることを確認した。

図4は4H-SiCエピ層を700 nm ロングパスフィルタを通して撮影したPL像である。図4(a)と(b)では明線が観測され、これは基底面転位(BPD)と考えられる⁽⁷⁾。ところが図4(c)に示す通り、1 MGy照射後にはBPDが完全に消失した。これらの結果から、ガンマ線照射はBPDの消失効果があると考えられる。また、積層欠陥を観察できる438 nm±12 nmのバンドパスフィルタを用いたPL像(未掲載)も撮影したところ、BPDは、図4実線矢印のような完全転位と、図4点線矢印に示すような積層欠陥の端である部分転位の2つに分類できた。これらBPDの消失メカニズムは、完全転位型BPDではBPD-TED変換⁽⁸⁾、部分転位型BPDでは積層欠陥の縮小により消失したと考えられる⁽⁹⁾。

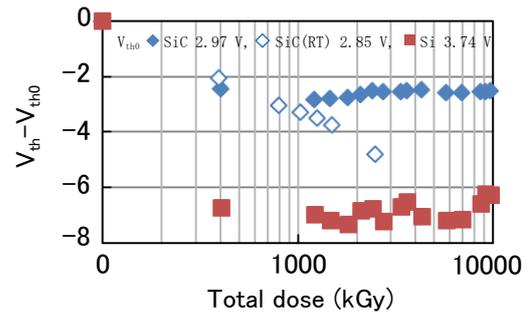


図2. 150°C加熱下におけるしきい値電圧のシフト ΔV_{th} の吸収線量依存

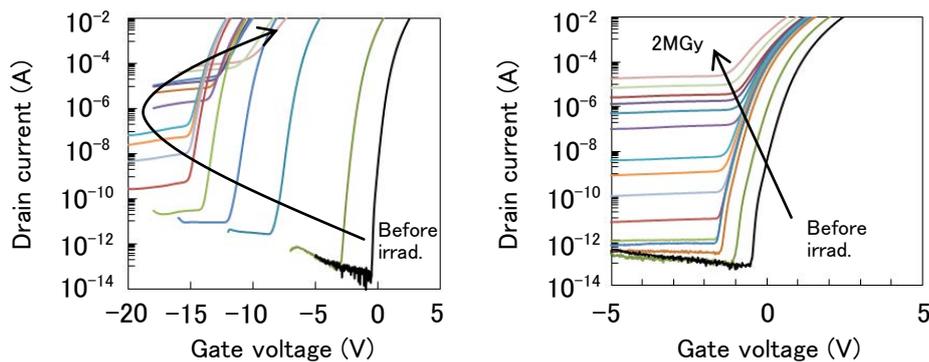


図3. 室温バイアス電圧印加下におけるSiC-MOSFETサブスレッショルド領域の吸収線量依存 (左: +4.5V, 右: -4.5V)

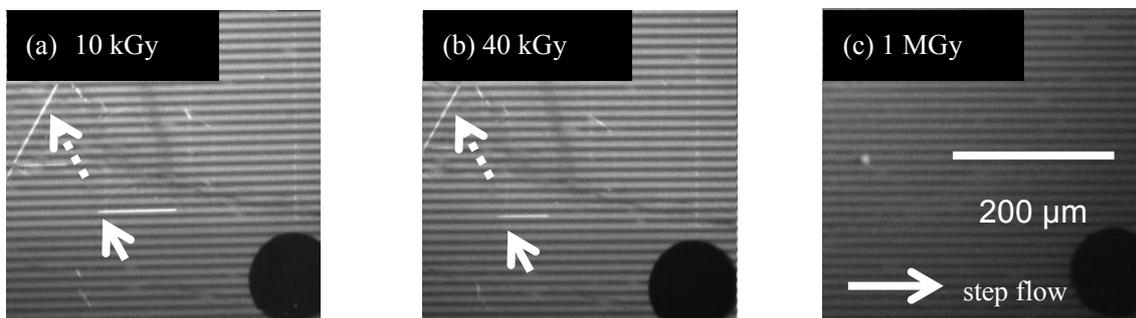


図4. 各ガンマ線量に対する4H-SiCエピ層のPL像(700 nm ロングパスフィルタ)

DLTS測定では(データ未掲載)、300 K付近の $Z_{1/2}$ と思われるピークは照射前からわずかに観測されたが、照射による増加は見られなかった。また、100 kGyまで他のピークは観測されなかったが、400 kGy時において、 P_3 、 $RD_{1/2}$ 、 RD_3 、 RD_4 と思われるピークが現れ始め、12 MGyまで増加し続けた。これら深い準位の起源は炭素空孔由来の $Z_{1/2}$ の増加がないこと、Si点欠陥由来のピーク

クは n 型試料では見られないことから、複合欠陥由来ではないかと考えられる。

図 5 左に、1.1MGy 照射時(PWM 周波数 10kHz)の SiC-MOSFET を用いたインバータ回路駆動時のドレイン電圧およびゲート電圧波形を示す。同図右にはインバータ電流波形を示す。いずれの波形も照射前と比べ変化はなく、モータは回転を維持することができた。この実験で用いた SiC-MOSFET の I_d - V_g 特性を測定した結果 (データ未掲載)、照射線量の増加とともに特性が負電圧方向へシフトしたが、ノーマリーオンの状態には陥らなかった。

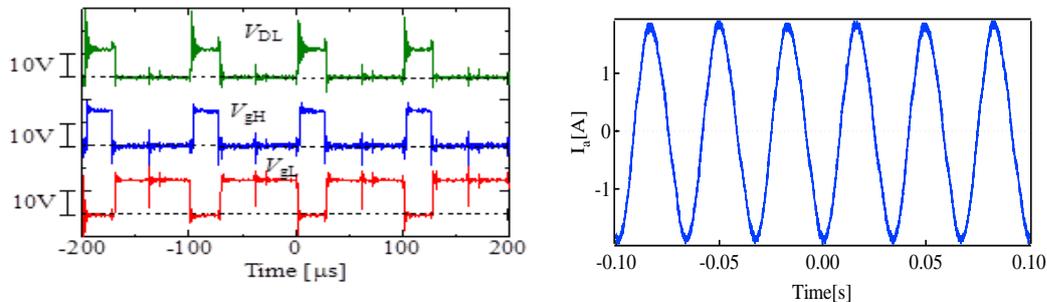


図 5. 1.1MGy 照射後(PWM 周波数 10kHz)のドレイン、ゲート電圧波(左)とモータ駆動電流波形(右)

3. まとめと今後の展望

ガンマ線耐性強化のための SiC-MOSFET 単体での最適デバイス構造・駆動条件はほぼ確立しつつあり、高温下での照射試験では目標の数 MGy を超える、5.8 MGy のガンマ線耐性が確認された。また、回路レベルでの開発目標であった 1 MGy 耐性も今回達成することができた。

これまでは主な劣化部位である酸化膜の劣化抑制を検討してきたが、今後は結晶損傷観察との関連性を踏まえ、SiC 半導体部位における劣化についても追究していきたい。また、駆動周波数を最適化するなどして、回路レベルでの更なる耐性強化を図っていきたい。

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) 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).
- (5) T. Ohshima et al., “Radiation Response of Silicon Carbide Metal-Oxide-Semiconductor Transistors in High Dose Region”, Jpn. J. Appl. Phys. in press.
- (6) T. Yokoseki et al., “Recovery of the Electrical Characteristics of SiC MOSFETs Irradiated with Gamma-rays by Thermal Treatments”, Mater. Sci. Form., vol. 821-823, pp. 705-708 (2015).
- (7) R. E. Stahlbush, K. X. Liu, Q. Zhang and J. J. Sumakeris, “Whole-Wafer Mapping of Dislocations in 4H-SiC Epitaxy Mater”. Sci.Forum 556-557 (2007) 295.
- (8) X. Zhang and H. Tsuchida, “Conversion of basal plane dislocations to threading edge dislocations in 4H-SiC epilayers by high temperature annealing” J. Appl. Phys. 111 (2012) 123512.
- (9) T. Miyanagi, H. Tsuchida, I. Kamata, T. Nakamura, K. Nakayama, R. Ishii and Y. Sugawara, “Annealing effects on single Shockley faults in 4H-SiC” Appl. Phys. Lett, 89 (2006) 062104.