### 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いての耐性も強 化されなければならない<sup>(1)</sup>。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<sup>(2)</sup>、このような複合環境下でも動作可能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<sup>(3)</sup>。

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一酸 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

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、+加湿) 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 ングによる線状欠陥または面状欠陥の観察や、Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS)法に より原子1個レベルの欠陥(点欠陥)の評価を行った。

## <u>2.1 実験について</u>

ガンマ線照射実験の試料には、TO3P パッケージに実装された耐圧 1.2 kV、定格電流 20 A、オン抵抗 100 mΩ (Vg = 20 V)、酸化膜厚 45 nm (乾燥酸素中 (Dry) 酸化+ N<sub>2</sub>0 処理)のサンケン電 気製 n チャネル 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<sup>°</sup>C加熱下、 2) 150<sup>°</sup>C加熱+加湿下、 3)室温 0V/±4.5V/±9V バイアス電圧印加下で、線量率 3.61 kGy (SiO<sub>2</sub>)/h の Co-60 ガンマ線を試料に照射した。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 TO220 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。電気特性の測定は Semiconductor Parameter Analyzer (Agilent Technologies 製 4156A)を用いて 室温・暗状態にて行った。

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。DLTS 測定についても同様の比較検討を行った。ただし、試料として前出の MOSFET と同じウエハに作製 された Test element group (TEG) 内 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た。ゲートに印加する PWM 信号の周波 数は 300Hz, 3kHz, 10kHz, 85kHz の4 種を試作した。負荷として 26W、定格電流 1.4A 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(3相ブリッジ)以外の回路系は全てガン マ線源から隔離し、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Si-及びSiC-MOSFETの150<sup>°</sup>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、リーク電流(負ゲート電圧下での $I_d$ )が3桁程上昇した。一方SiCの場合、負 電圧側へのシフトやリーク電流がSi比べかなり抑制され、さらにSiCの室温照射の場合と比較し ても劣化が抑制されることがわかった。従って、高温・高湿下という極限環境において、SiC-MOSFET は優れたガンマ線耐性を示すことを確認した。



図 1. 150℃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) 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<sup>(4)</sup>。図2は、150℃加熱下でのガンマ線照射におけるしきい値電圧(V<sub>th</sub>)の

吸収線量依存を示す。一般に、正の酸化膜固 定電荷の生成量に比例して $V_{\rm th}$ は減少する。 同図より、本実験に使用した試料では、 SiC-MOSFET は Si よりも高い線量までノーマ リーオフを維持したことから、より優れたガ ンマ線耐性を有すると言える。また、SiC 及 び Si に関わらず、ガンマ線照射によって正の 酸化膜固定電荷は生成するが、高温照射の場 合 $V_{\rm th}$ が下げ止まり、ほぼ一定値に落ち着く。 従って、本実験により、高温加熱には正の固 定電荷を除去する効果を有することが明らか にされた<sup>(5,6)</sup>。



図 2. 150℃加熱下におけるしきい値電圧 V<sub>th</sub>の吸 収線量依存

図3に、室温バイアス電圧印加下における SiC-MOSFET の *I<sub>d</sub>-V<sub>g</sub>*特性の吸収線量依存性を示す (*V<sub>d</sub>*=10 V)。同図左より、正バイアスの *I<sub>d</sub>-V<sub>g</sub>*曲線は大きく負電圧側にシフトした後、200kGy 以降 は逆に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。前述した通り、負電圧側へのシフトは酸化膜固定電荷の生成に起因するが、正電圧側へ のシフトは SiC-ゲート酸化膜界面における界面準位の生成に対応する<sup>(4)</sup>。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捕獲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 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<sup>(7)</sup>。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、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。



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使用)

DLTS 測定では(データ未掲載)、300 K 付近の Z<sub>1/2</sub>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<sub>d</sub>-V<sub>s</sub>*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、10.4 MGy のガンマ線耐性が達成された。 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。今後は、本研 究で培った放射線耐性技術をふんだんに盛り込んだ SiC パワーデバイスを用い、非接触充電装置 等のパワーエレクトロニクス機器に応用し、超耐放射線性を備えた機器実現を実証していきたい。 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 Hijikata, Y., 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) Ohshima, T., et al., "Radiation Response of Silicon Carbide Metal-Oxide-Semiconductor Transistors in High Dose Region", Jpn. J. Appl. Phys. in press.

(6) Yokoseki, T., 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) Stahlbush, R. E., et al., "Whole-Wafer Mapping of Dislocations in 4H-SiC Epitaxy," Mater. Sci. Forum 556-557 (2007) 295.