

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：14303

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K19769

研究課題名(和文) 宇宙環境における次世代パワー半導体の寿命予測

研究課題名(英文) Life prediction of next generation power semiconductors in space environment

研究代表者

古田 潤 (Furuta, Jun)

京都工芸繊維大学・電気電子工学系・助教

研究者番号：30735767

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：次世代半導体であるSiC MOSFETにガンマ線を照射し、トータルドーズ効果の影響を評価した。SiC MOSFETはSi MOSFETと比較して高いトータルドーズ効果への耐性を持つことが分かった。特にSiC planar MOSFETでは放射線耐性が高く、150kradのガンマ線に対して-0.5Vしか閾値電圧が変化しなかった。トータルドーズ効果により劣化した素子のゲート端子に高電圧を印加し、経年劣化であるBTIの影響を測定した。その結果、SiC MOSFETでは46V程度印加することでトータルドーズ効果による劣化から完全に回復することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

次世代パワー半導体であるSiC MOSFETはSi半導体と比較して高速な動作が可能であり、電力変換回路の小型軽量化が可能である。本研究成果によりSiC MOSFETを宇宙空間で用いることは人工衛星小型軽量化のみでなく、長寿命化にも寄与することができることが分かった。また、SiC trench MOSFETではゲート端子に高電圧を印加することでトータルドーズ効果による回復が可能であるため、定期的に高い電圧を印加することでさらなる長寿命化が可能である。

研究成果の概要(英文)：SiC MOSFETs, the next-generation semiconductors, were irradiated with gamma rays to evaluate the total dose effect, and SiC MOSFETs were found to have higher tolerance to total dose effect than Si MOSFETs. In particular, SiC planar MOSFETs showed higher radiation tolerance, the threshold voltage changed by only -0.5 V against 150 krad of gamma radiation. A high voltage was applied to the gate terminals of the devices degraded by the total dose effect to measure the effect of BTI, which is degradation over time. As a result, it was confirmed that SiC MOSFETs fully recovered from degradation due to the total dose effect by applying gate voltage of 46 V.

研究分野：半導体の信頼性

キーワード：放射線 SiCパワー半導体 トータルドーズ効果

## 1. 研究開始当初の背景

人工衛星の推進方式に電気推進が利用され、電力変換回路の占める割合が急増している。電力変換回路の小型化として SiC などの次世代パワー素子が注目されている。宇宙用途では故障無く長期使用可能であることが重要となる。次世代パワー半導体の経年劣化や高い放射線環境における影響の評価が極めて重要となる。パワー半導体で利用される n 型 MOSFET においては放射線の電離作用によって閾値電圧が減少するトータルドーズ効果の影響と、ゲート電圧を長時間印加することで閾値電圧が増加する NBTI の評価が寿命予測において重要である。

本研究では次世代パワー半導体の経年劣化と放射線による劣化がどちらもゲート酸化膜での電荷の捕獲によって生じる現象であることに着目し、経年劣化と放射線の影響の相互関係の評価する。放射線照射を行い、閾値電圧が減少した次世代パワー半導体に対して高電圧をゲート端子に印加する。それによりゲート電圧による経年劣化が放射線による閾値電圧の減少を改善可能であるかを測定し、地上における経年劣化と宇宙における経年劣化の進行速度・特性の違いを明らかにする。

## 2. 研究の目的

人工衛星の推進方式に電気推進が利用され、電力変換回路の占める割合が急増している。電力変換回路の小型・軽量化として高速動作可能な SiC や GaN などの次世代パワー素子が注目されている。人工衛星の打ち上げには高いコストが必要であり、軽量化による燃料の抑制と長期間運営の実現によるコストパフォーマンスの改善が重要である。電力変換回路の長期間使用のためには次世代パワー半導体の経年劣化や高い放射線環境における影響の評価が極めて重要となる。

本研究では次世代パワー半導体の経年劣化と放射線による劣化がどちらもゲート酸化膜での電荷の捕獲によって生じる現象であることに着目し、経年劣化と放射線の影響の相互関係の評価する。ガンマ線などの放射線を照射することで次世代パワー半導体におけるしきい値電圧の減少効果の影響を測定する。

## 3. 研究の方法

SiC MOSFET 及び SiC trench MOSFET に対してガンマ線やアルファ線などの放射線を照射し、トータルドーズ効果の影響の評価する。トータルドーズ効果によって閾値電圧が減少した MOSFET に対してゲート電圧を印加し、閾値電圧の増加量(回復量)を測定する。放射線によってゲート酸化膜中に捕獲された正孔が、ゲート電圧の印加によって形成される n 型のチャネルから捕獲される電子によって中和可能かの測定を行う。それによりガンマ線照射によるトータルドーズ効果の加速試験では放射線による影響を過大評価していることを確認し、ゲート電圧印加による経年劣化の加速試験も行わなければ正確な寿命予測ができないことを確認する。

## 4. 研究成果

- (1) Si, SiC planar, SiC trench MOSFET のトータルドーズ効果に対する耐性評価を行った。静止衛星軌道において必要といわれる 150krad のガンマ線を照射した場合の IV 特性の変化を図 1 に示す。Si MOSFET と比較して本研究で評価した SiC MOSFET は閾値電圧の変化が小さい結果となった。一方で SiC trench MOSFET は planar 構造のものよりも閾値電圧の変化が大きい結果となった。この原因として、Trench 構造の製造難易度と、SiC の結晶構造の違いが考えられる。Trench 構造は SiC 基板を削ってゲート端子を作成するため、ゲート酸化

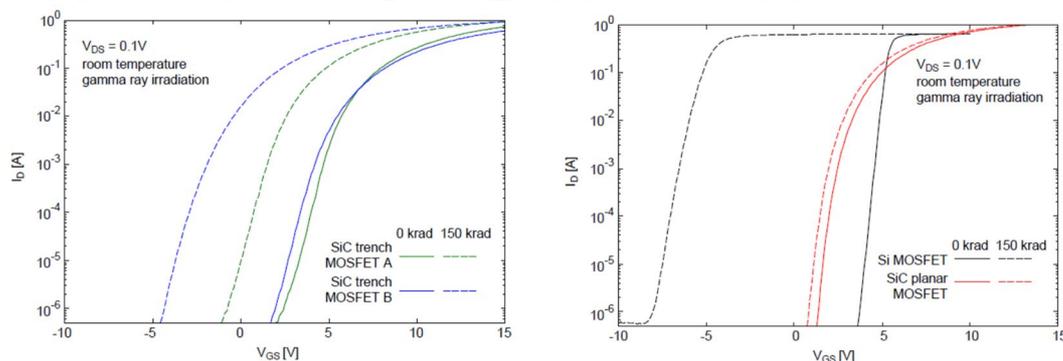


図 1 : 放射線による SiC MOSFET の閾値電圧変化

膜の生成時に十分に酸化することが難しく、ゲート酸化膜の質が悪くなる可能性がある。そのため、酸化膜内の欠陥が多く、放射線によって生じた正孔を捕獲しやすいと推測する。また、SiCの結晶構造は六角柱であるため、planar型とは異なる結晶面に酸化膜が形成されることになる。この結晶面の違いも原因となりうる。

- (2) ゲート電圧印加による NBTI の経年劣化を加速試験するためにゲート電圧を通常の駆動電圧である 18V よりも高い電圧を印加し、閾値電圧の増加を評価した。その結果を図 2 に示す。本研究で測定した 2 種類の SiC trench MOSFET では放射線による閾値電圧  $V_{th}$  の減少量が異なっており、SiC\_Bの方が倍程度  $V_{th}$  の減少量が多い。一方で高電圧印加による  $V_{th}$  の増加については SiC\_B のほうが早く、38V 程度の電圧で元の  $V_{th}$ (fresh) よりも大きい値となった。SiC\_A についても 48V 程度印加することで回復しきることが確認できた。この  $V_{th}$  の回復はゲート電圧を除去して長期間(図では 2 か月)放置することで、 $V_{th}$  が減少するものの、放射線によって減少していた  $V_{th}$  の値と比較すると小さい。この結果から SiC trench MOSFET では NBTI による電子の捕獲によって  $V_{th}$  が増加する劣化と、同時に捕獲された電子の大部分が放射線によって捕獲されていた正孔を再結合し、放射線の影響を除去していることが分かる。本研究で測定した 2 つの SiC trench MOSFET におけるトータルドーズ効果の影響の違いは酸化膜厚の違いによるゲート電界強度の違いによって生じていると推測しており、今後の研究では測定対象の構造の解析を進める予定である。

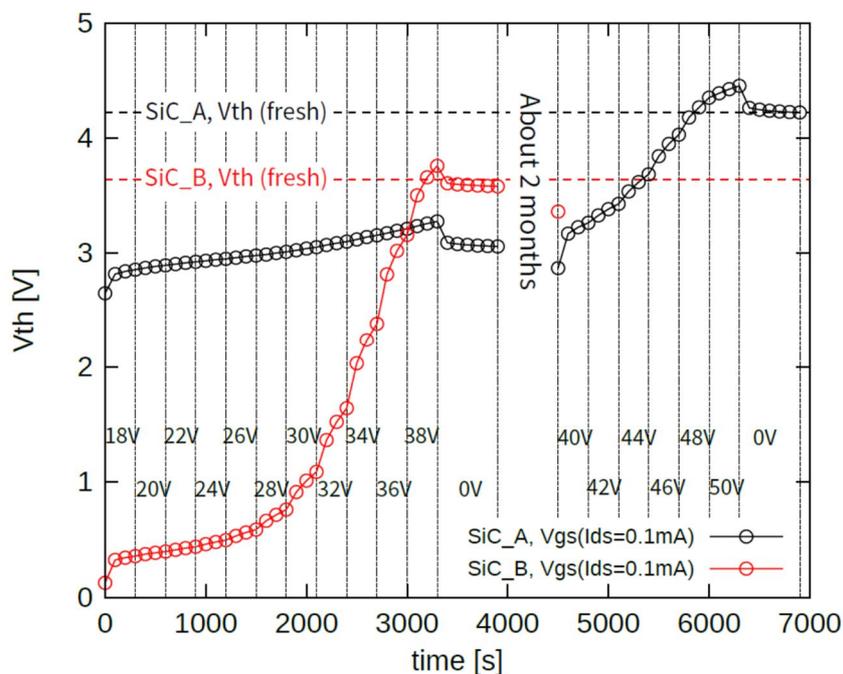


図 2 : 高電圧印加による NBTI の影響と、トータルドーズ効果の回復

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 古田潤, 小林和淑
2. 発表標題 アルファ線を利用したトータルドーズ効果によるSiC MOSFETの劣化測定
3. 学会等名 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古田潤
2. 発表標題 放射線による半導体素子の一時故障と劣化現象
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jun Furuta, Masatoshi Mizushima and Kazutoshi Kobayashi
2. 発表標題 Measurement of Total Ionizing Dose Effects on SiC Trench MOSFETs by Gamma-ray and Alpha-particle Irradiation
3. 学会等名 The conference on Radiation and its Effects on Components and Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 水嶋雅俊, 小林和淑, 古田潤
2. 発表標題 高ゲートバイアス印加による SiC パワー MOSFET の トータルドーズ回復現象の測定
3. 学会等名 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------