

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21360471

研究課題名（和文） イオンビーム誘起電荷による炭化ケイ素半導体上の酸化膜破壊機構に関する研究

研究課題名（英文） Mechanism of the Destruction of Oxide on Silicon Carbide due to Charge Induced by Ion Beams

研究代表者

大島 武（OHSHIMA TAKESHI）

独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究主幹

研究者番号：50354949

研究成果の概要（和文）：炭化ケイ素（SiC）金属-酸化膜-半導体（MOS）デバイスの重イオン誘起酸化膜破壊（SEGR）の機構解明を目的に、SiC MOS キャパシタに酸素やニッケルといった重イオンを入射し、誘起電荷の挙動とゲート印加電圧の関係を明らかにした。加えて、イオン照射中のゲート酸化膜からのリーク電流を評価することで、イオンのエネルギー付与（LET）が大きい場合は、多量に発生した電荷が引き金となり SEGR が発生することを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In order to understand the mechanism of heavy ion induced dielectric breakdown (SEGR) of Silicon Carbide (SiC) devices, the relationship between bias applied to gate oxide and charge induced in SiC MOS capacitors by heavy ions such as oxygen and nickel was revealed. By measuring the leakage current observed from gate oxide during ion irradiation, it was found that SEGR is triggered by dense ion-induced charge if the linear energy transfer (LET) of incident ions is large.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
2010 年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2011 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：放射線工学、ビーム科学

## 1. 研究開始当初の背景

炭化ケイ素（SiC）半導体は、優れた物性（ワイドバンド、高絶縁破壊電界、高熱伝導率等）を有することから、超低損失パワーデバイスへの応用が期待されている。これまで、バルク結晶やエピタキシャル膜成長技術、デバイス作製技術といった実用化へ向けた様々な研究・開発が国内外で活発に行われ、現在、デバイスの販売はもとより、SiC を実装したモジュールの試作も開始された。

SiC は実用化に向けて大きく踏み出したが、今後、確実に実用化へ結びつけるためには、デバイス特性をさらに向上させることは勿論、信頼性や耐久性に関する研究が重要である。金属-酸化膜-半導体（MOS）デバイスの酸化膜の長時間負荷の耐久性や、金属電極の安定性・信頼性に関する報告がなされる等、確実に知見は蓄積されている。高電圧・大電流でその特長が発揮されるパワーデバイスにとって、信頼性の確立という意味では、上

述に加え、放射線入射がデバイス特性に与える影響の評価も重要となる。これは、宇宙から飛来する高エネルギー陽子線が大気と相互作用することで発生した中性子がデバイスに入射することで誤動作や破壊を誘発するためである。加えて、申請者らはこれまでに、SiC デバイスが優れた耐放射線（ガンマ線）性を示すことを明らかにしており[2]、SiC は地上用だけでなく、人工衛星等で使用可能な宇宙用のデバイスへの応用も期待される。宇宙では、ガンマ線に限らずイオンや電子線といった様々な放射線が多量に存在することから、宇宙用 SiC デバイス開発の観点からも放射線照射効果の把握と耐放射線性の強化技術開発が不可欠となる。

## 2. 研究の目的

本研究では、SiC エピタキシャル（エピ）基板上に、乾燥酸素や水素燃焼酸化といった酸化方法を用いて MOS キャパシタ及び MOSFET を作製し、これら MOS デバイスに重イオンを入射することで SiC MOS デバイスの重イオン誘起酸化膜破壊（SEGR）の機構解明を目的とした。そこで、具体的に、以下の(1)～(3)の目標を掲げ研究を展開した。

- 1) 単一イオン入射により酸化膜に誘起されるナノ秒オーダーの高速電荷の挙動とゲート酸化膜への印加電圧（電界強度）の関係を明らかにする。
- 2) SiC エピ膜の種類や酸化膜作製条件と照射効果の関係を調べる。
- 3) ガンマ線照射により特性を劣化させた SiC MOS デバイスに対しても同様な評価を行い、宇宙のような複合環境下で重要となる耐放射線性に関する知見を得る。

## 3. 研究の方法

SiC エピ基板に様々な酸化方法を用いて MOS デバイス作製する。電気特性の評価後、単一重イオン入射によるゲート酸化膜からのイオンビーム誘起過渡電流（TIBIC）測定・評価を行う。TIBIC では数ナノ秒レベルの高速・微弱電流の測定が可能であるが、測定系の仕様から、SEGR 発生時に瞬間的に発生する絶縁破壊大電流の計測はできない。そこで本研究では、SEGR を直接観測する新たな評価技術を開発する。また、MOS デバイスにガンマ線及び電子線照射を行い、電気特性の変化（界面準位や酸化膜固定電荷）を調べるとともに、TIBIC や SEGR 測定を行う。

## 4. 研究成果

図 1 に n 型 6H-SiC エピ基板上に作製した MOS キャパシタに 15MeV-酸素 (0) イオンを入射した時の TIBIC シグナルを示す。MOS キャパシタのゲート酸化膜は 1180 °C で 120 分間の乾燥酸素中酸化の後、800 °C で 15 分間

の水素燃焼酸化雰囲気 (H<sub>2</sub> : O<sub>2</sub> = 1:1) でのアニールを用いて形成している。酸化膜厚は容量 (C) -電圧 (V) 測定より 39nm と見積もられた。TIBIC 測定中には -15V のバイアスを印加している。図中の実線は、最初の 50 回の TIBIC 測定の平均波形である。図より、ピーク値は 0.10mA、ピーク値の 90% から 10% に減衰するまでに要する時間である減衰時間が 1.75ns であることが分かる。ところが、TIBIC 測定を重ねるうちにシグナルピーク値は低下し、減衰時間が長くなる現象が見出された。図中の破線は TIBIC 測定 1000 回目から 3000 回目の平均シグナルを示すが、ピーク値は 0.013mA、減衰時間は 6.83ns となっている。

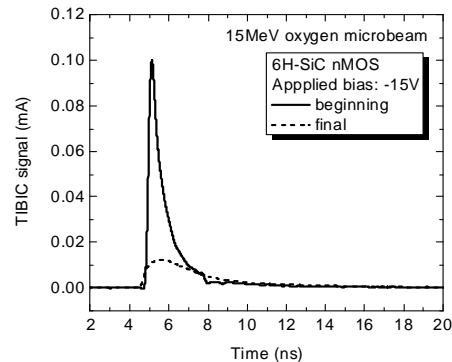


図 1 n 型 6H-SiC エピ基板上に作製した MOS キャパシタに 15MeV-酸素 (0) イオンを入射した時の TIBIC シグナル

シグナルの変化を詳細に調べるために、TIBIC のピーク値及び収集電荷量と入射イオン数の関係を調べた。結果を図 2 (a) 及び (b) にそれぞれ示す。ここで収集電荷量は TIBIC シグナルを時間積分することで見積もった。図 2 (a) より、TIBIC シグナルピーク値は入射イオン数の増加とともに減少し、1000 個のイオン入射後には 0.013mA で飽和することが分かる。ところが、3150 個のイオン入射後に、測定を一時中断し、+1 のバイアスを 1 分間印加し、再び -15V 印加し TIBIC 測定を開始したところ、TIBIC シグナルピークは初期値に回復することが分かった。その後、入射イオン数の増加とともに TIBIC シグナルピークが減少し飽和する現象が観察された。図には示さないが、再び +1V 印加すると回復が観測された。印加電圧により初期値に回復することから、観測された TIBIC シグナルの減少はイオン照射による結晶欠陥の生成では無いと帰結できる。収集電荷量に関しても同様に、減少、飽和、その後 +1V バイアス印加で回復するという振る舞いが見られた (図 2 (b) 参照)。

TIBIC シグナルの減少の原因を調べるため、イオン照射中の MOS キャパシタの容量の変化を調べた。結果を図 3 に示す。図より、

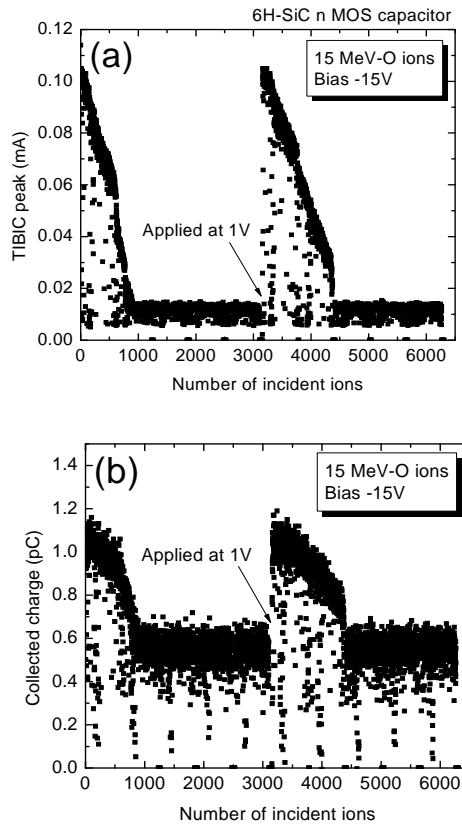


図 2 (a) TIBIC のピーク値及び(b)収集電荷量と入射イオン数の関係

イオン入射数の増加とともに容量が増加し、最終的に飽和することが分かる。このことは、イオン照射により空乏層幅が徐々に短くなっていることを意味し、イオン入射により発生する電荷が酸化膜/半導体界面に集まることで空乏状態から反転状態になること、また、界面欠陥に正の電荷が捕獲されていることが原因となり内部電界が弱められ、結果的に TIBIC シグナルや収集電荷量が減少すると結論できる。

図には示さないが、p 型エピ基板上的の MOS キャパシタにおいても、n 型 MOS キャパシタで確認された 0 イオン入射によって MOS キャパシタのゲートから観測される TIBIC シグナルのピーク値が、入射 0 イオン数の増加と共に減少すること、更に、照射後、MOS キャパシタに順方向バイアスを印加することで、過渡電流ピーク値が初期値に戻るが見出されている。これにより、p 型においても、反転や深い界面準位等の影響で TIBIC シグナルの減少が発生することが判明した。また、n 型エピ基板上的の MOS と p 型の MOS を比較すると、p 型の方が、過渡電流のピーク値が急激に低下することも併せて見出されている。これは、収集される電荷が少数キャリアであることから、p 型では n 型に比べ移動度の大きな電子が、この振る舞いに関与してい

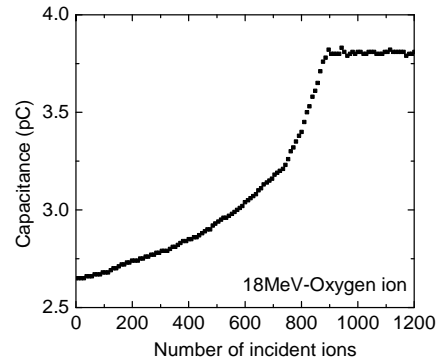


図 3 イオン照射中の MOS キャパシタの容量の変化

るため急激な変化が見られたのではと推測される。

次に、ガンマ線照射による TIBIC シグナルの影響に関して調べた。図 4 に n 型エピ基板に作製した MOS キャパシタのガンマ線未照射時及び 52.2 kGy 照射後の TIBIC シグナルのピーク値と 15MeV-O イオン入射数の関係を示す。ガンマ線は 8.7 kGy/h のドーズ率で室温にて照射した。また、ガンマ線照射時にはゲート電極にバイアスは印加していない。TIBIC 測定時には -15V のバイアスをゲート電極に印加している。図 2(a)と同様に入射イオン数の増加とともにピーク値が減少し、最終的に 0.012mA に飽和することが分かる。このピーク値の減少は、ガンマ線を照射した試料においても同様に観察され、+1V のバイアスにより初期値に回復することが分かる。ガンマ線照射前後を比較すると、初期のピーク値が未照射では 0.097mA であったのに対し、ガンマ線照射後には 0.086mA と小さくなっている。ガンマ線照射による TIBIC シグナルのピ

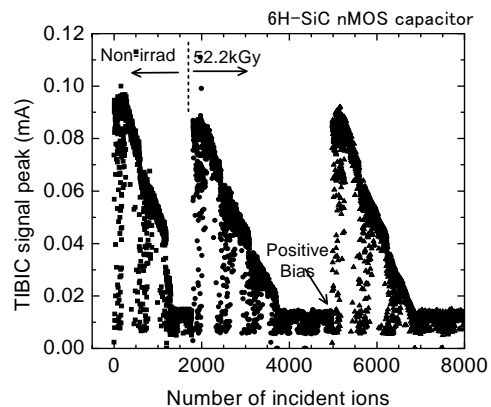


図 4 n 型エピ基板に作製した MOS キャパシタのガンマ線未照射時及び 52.2 kGy 照射後の TIBIC シグナルのピークの 15MeV-O イオン入射による変化

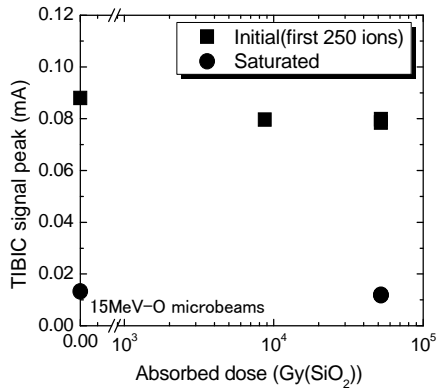


図 5 ガンマ線照射による TIBIC シグナルのピーク値の低下とガンマ線照射量の関係

ーク値の低下とガンマ線照射量の関係を図 5 に示す。■及び●は、それぞれ、TIBIC 測定の初期値（最初の 250 個の平均）及び飽和後の値である。初期値、飽和値ともにガンマ線の照射により低下することが見て取れる。飽和値に着目すると、ガンマ線未照射では  $1.33 \times 10^{-5} \text{A}$  であったのが、52.5kGy 照射後には  $1.19 \times 10^{-5} \text{A}$  となっている。我々のこれまでの研究で、Si MOS キャパシタではガンマ線照射による TIBIC シグナルピーク値の低下は、ゲート酸化膜中に生成された電荷に起因するフラットバンド電圧のシフトで説明できることが明らかとなっている。そこで、SiC MOS キャパシタにおいても同様に解釈できるかを調べた。ガンマ線照射前後の C-V 特性の変化からフラットバンドのシフトを求めたところ 0.02V と見積もられた。次に、ガンマ線未照射試料の TIBIC ピーク値の印加電圧依存性から、飽和値が  $1.19 \times 10^{-5} \text{A}$  となる TIBIC 測定時の印加電圧を求めると -12.5V であった。ガンマ線照射後、-15V のバイアスを印加して TIBIC 測定をした時にピーク値が  $1.19 \times 10^{-5} \text{A}$  に飽和することから、ガンマ線照射により TIBIC シグナルは 2.5V のバイアス分の変化を示したといえる。フラットバンドシフト (0.02V) と TIBIC 測定で得られたバイアス分 (2.5V) が一致しないことから、SiC MOS キャパシタでのガンマ線照射による TIBIC シグナルの減少は、ガンマ線照射により酸化膜中に発生した電荷量では説明できないことが判明した。さらに、C-V 測定よりミッドギャップ電圧のガンマ線照射後のシフト量を見積もったが -0.10V であり、やはり 2.5V とは一致しないことが分かった。つまり、SiC MOS キャパシタにおけるガンマ線照射による TIBIC シグナルの低下は、ガンマ線照射により酸化膜中に発生する電荷に起因するという単純な描像では解釈できないと結論できる。

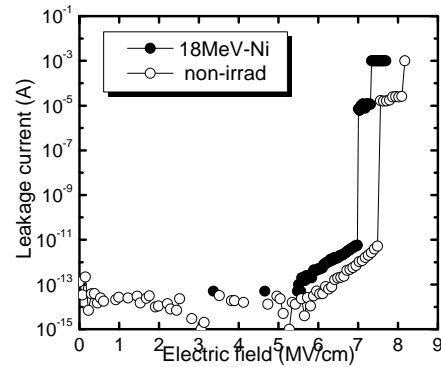


図 6 イオン照射中の MOS キャパシタのゲート酸化膜からのリーク電流の変化

SiC MOS キャパシタの SEGR に関する情報を得るため、イオン照射中の MOS キャパシタのゲート酸化膜からのリーク電流の変化を評価した (図 6)。18MeV-0 イオン照射の場合は 8.2MV/cm 程度でゲート酸化膜絶縁破壊が観測され、イオン未照射との差異は見られなかったが、18MeV-Ni イオン入射の場合は 7.3MV/cm で絶縁破壊が発生した。18MeV-0 の線エネルギー付与 (LET) は  $7 \text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$  であるのに対し、18MeV-Ni は  $24 \text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$  であり、Ni の場合、多量の電荷がデバイス内に誘起されることから、多量に発生した電荷が引き金となりイオン誘起絶縁破壊に至ったと考えられる。

SEGR の評価手法の開発では、図 7 に示すような測定系を試作した。測定系開発が目的であることから、電荷の発生が小さな MOS キャパシタではなく、電荷シグナルが大きいショットキーダイオード (SBD) を試験用デバイスとして用いた。図 8 に 150MeV-Ar イオンを入射した場合の収集電荷と SBD への印加電圧の関係を示す。印加電圧が 700V 以下と低い場合は、2.7pC 付近に一つの電荷ピーク (通常の電荷収集) が観測されるのみであるが、800V 以上では 2.7pC のピークは小さくなり低電荷側に電荷収集が観測され、830V 印加ではこの傾向がさらに強くなっている。これは、シングルイベント破壊 (SEB) の兆候を示すものであり、今回試作した測定系が SEGR の評価としても使用可能であると考えられる。

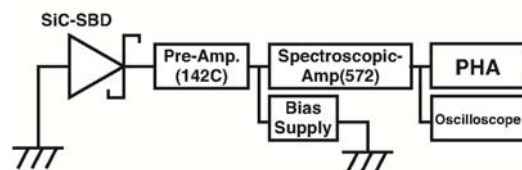


図 7 SEGR 測定系の模式図

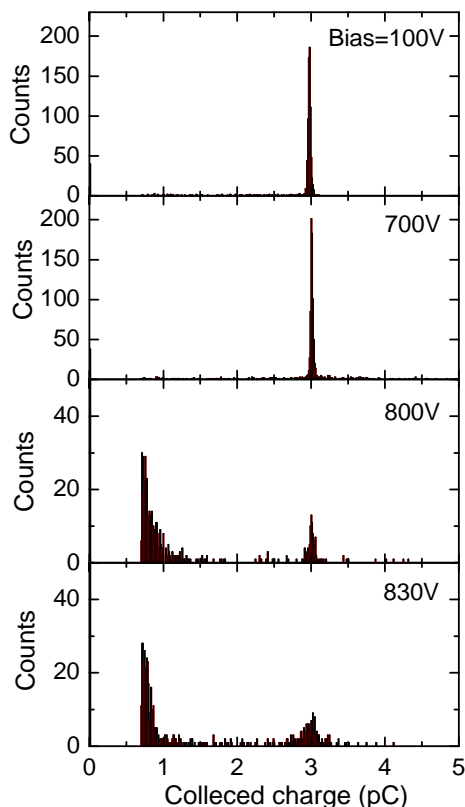


図 8 150MeV-Ar イオンを入射した場合の収集電荷と SBD への印加電圧の関係

本研究では、上記に加え照射欠陥の発生が電荷収集に及ぼす影響についても調べた。SiC 中の炭素 (C) イオンのみをはじき出す 200keV の低エネルギー電子線照射を行い、収集電荷量に及ぼす変化を評価したところ、電子線の照射量の増加と共に電荷量が低下した。これより、電荷収集量を低下させる欠陥として C 関連欠陥が関与すると結論できた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① T. Makino, N. Iwamoto, S. Onoda, T. Ohshima, K. Kojima, S. Nozaki, "Peak Degradation of Heavy-Ion Induced Transient Currents in 6H-SiC, MOS Capacitors", Materials Science Forum **717-720** (2012) pp. 469-472 査読有.
- ② N. Iwamoto, A. Koizumi, S. Onoda, T. Makino, T. Ohshima, K. Kojima, S. Koike, K. Uchida, S. Nozaki, "Defects in an Electron-Irradiated 6H-SiC Diode Studied by Alpha Particle Induced Charge Transient Spectroscopy: Their

Impact on the Degraded Charge Collection Efficiency", Materials Science Forum **717-720** (2012) pp. 267-270 査読有.

- ③ N. Iwamoto, A. Koizumi, S. Onoda, T. Makino, T. Ohshima, K. Kojima, S. Koike, K. Uchida, and S. Nozaki, "Single-Alpha-Particle-Induced Charge Transient Spectroscopy of the 6H-SiC p<sup>+</sup>n Diode Irradiated With High-Energy Electrons", IEEE Transaction on Nuclear Science **58** (2011) pp. 3328-3332 査読有.

- ④ T. Ohshima, N. Iwamoto, S. Onoda, T. Makino, S. Nozaki, K. Kojima, "Oxygen Ion Induced Charge in SiC MOS Capacitors Irradiated with Gamma-rays", Materials Science Forum **679-680** (2011) pp. 370-373 査読有.

- ⑤ T. Ohshima, N. Iwamoto, S. Onoda, T. Makino, M. Deki, S. Nozaki, "Refreshable Decrease In Peak Height Of Ion Beam Induced Transient Current From Silicon Carbide Metal-Oxide-Semiconductor Capacitors", AIP conference proceedings 1336 Application of Accelerators in Research and Industry, (2011) pp. 660-664 査読有.

- ⑥ S. Onoda, T. Makino, N. Iwamoto, G. Vizkelethy, K. Kojima, S. Nozaki, T. Ohshima, "Charge Enhancement Effects in 6H-SiC MOSFETs Induced by Heavy Ion Strike", IEEE Transactions on Nuclear Science **57** (2010) pp. 3373-3379 査読有.

- ⑦ T. Ohshima, N. Iwamoto, S. Onoda, T. Makino, M. Deki, S. Nozaki "Change in Current Induced from Silicon Carbide Metal - Oxide - Semiconductor Capacitors by Oxygen Ions", Proc. of 9th Internat. Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Applications (2010) pp. 85-91 査読無.

- ⑧ S. Onoda, G. Vizkelethy, T. Makino, N. Iwamoto, K. Kojima, S. Nozaki, T. Ohshima, "Enhanced Charge Collection in Drain Contact of 6H-SiC MOSFETs Induced by Heavy Ion Microbeam", Proc. of 9th Internat. Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Applications (2010) pp. 230-233 査読無.

- ⑨ N. Iwamoto, S. Onoda, T. Ohshima, K. Kojima, A. Koizumi, K. Uchida, S. Nozaki, "Charge Collection Efficiency of 6H-SiC P<sup>n</sup>N Diodes Degraded by Low-Energy Electron Irradiation", Materials Science Forum **645-648** (2010) pp. 921-924 査読有.

[学会発表] (計 8 件)

- ① N. Iwamoto, A. Koizumi, S. Onoda, T. Makino, T. Ohshima, K. Kojima, S. Koike, K. Uchida, S. Nozaki, "Defects in an Electron-Irradiated 6H-SiC Diode Studied by Alpha Particle Induced Charge Transient Spectroscopy: Their Impact on the Degraded Charge Collection Efficiency", Internat. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2011 (ICSCRM2011), 2011 年 9 月 11-16 日, Cleveland (USA).
- ② T. Makino, N. Iwamoto, S. Onoda, T. Ohshima, K. Kojima, S. Nozaki, "Peak Degradation of Heavy-Ion Induced Transient Currents in 6H-SiC MOS capacitors", Internat. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2011 (ICSCRM2011), 2011 年 9 月 11-16 日, Cleveland (USA).
- ③ T. Ohshima, N. Iwamoto, S. Onoda, T. Makino, M. Deki, S. Nozaki "Change in Current Induced from Silicon Carbide Metal - Oxide - Semiconductor Capacitors by Oxygen Ions", 9th Internat. Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Applications (9thRASEDA), 2010 年 10 月 27-29 日, Takasaki (Japan).
- ④ S. Onoda, G. Vizkelethy, T. Makino, N. Iwamoto, K. Kojima, S. Nozaki, T. Ohshima, "Enhanced Charge Collection in Drain Contact of 6H-SiC MOSFETs Induced by Heavy Ion Microbeam", 9th Internat. Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Applications (9thRASEDA), 2010 年 10 月 27-29 日, Takasaki (Japan).
- ⑤ T. Ohshima, N. Iwamoto, S. Onoda, T. Makino, S. Nozaki, K. Kojima, "Oxygen Ion Induced Charge in SiC MOS Capacitors Irradiated with Gamma-rays", The 8th European Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ECSCRM), 2010 年 8 月 29 日-9 月 2 日, Oslo (Norway).

- ⑥ T. Ohshima, N. Iwamoto, S. Onoda, T. Makino, M. Deki, S. Nozaki, "Refreshable Decrease in Peak Height of Ion Beam Induced Transient Current from Silicon Carbide Metal-Oxide-Semiconductor Capacitors", 21st International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry (CAARI), 2010 年 8 月 8-13 日, Fort Worth (USA).
- ⑦ S. Onoda, T. Makino, N. Iwamoto, G. Vizkelethy, K. Kojima, S. Nozaki, T. Ohshima, "Charge Enhancement Effects in 6H-SiC MOSFETs Induced by Heavy Ion Strike", IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference (NSREC), 2010 年 7 月 19-23 日, Denver (USA).
- ⑧ N. Iwamoto, S. Onoda, T. Ohshima, K. Kojima, A. Koizumi, K. Uchida, and S. Nozaki, "Charge Collection Efficiency of 6H-SiC P<sup>n</sup>N Diodes Degraded by Low-Energy Electron Irradiation", The 13th International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2009 (ICSCRM2009), 2009 年 10 月 11-16 日, Nuremberg (Germany).

[その他]

ホームページ等

[http://www.taka.jaea.go.jp/eimr\\_div/RadEffects/index\\_j.html](http://www.taka.jaea.go.jp/eimr_div/RadEffects/index_j.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大島 武 (OHSHIMA TAKESHI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・

量子ビーム応用研究部門・研究主幹

研究者番号：50354949

### (2) 研究分担者

小野田 忍 (ONODA SHINOBU)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・

量子ビーム応用研究部門・研究職

研究者番号：30414569