

平成 21年 6月 1日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18360458
 研究課題名（和文） 炭化ケイ素半導体を基板とする放射線検出器開発のための誘起電荷評価
 研究課題名（英文） Induced Charge Evaluation for the Development of Particle Detectors Fabricated on Silicon Carbide
 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：耐放射線性炭化ケイ素（SiC）粒子検出器開発に必要な基礎データとして、ベータ線、アルファ線及びイオン入射により、SiC ダイオードに発生する電荷の収集効率（CCE）を調べた。アルファ線等では、ほぼ100%のCCEを観測しSiCの検出器応用の有効性を実証した。一方、Niのような重イオンではSiCの物性に起因するCCEの低下が見出された。更に、電子線等により損傷を加えたSiCダイオードのCCE低下を調べ、優れた耐性を明らかにした。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	7,600,000	0	7,600,000
2007年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
総計	14,800,000	2,160,000	16,960,000

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：放射線理工学、耐放射線性検出器

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・化学的安定性より耐環境性半導体素子への応用が期待されている。特に、我々のこれまでの研究により、非常に優れた耐放射線性を有することが検証されており、SiCを用いることで、従来のシリコン（Si）素子の限界を超えた耐放射線性素子を実現することが可能となる。一方、高エネルギー物理学では研究の高度化から高エネルギー・大電流加速器の要求が高まっており、それに関連して、粒子検出器の耐放射線性向上という課題が発生している。現在、粒子検出器の材質はSiが主流であるが、耐性向上には新材料である

SiCが有効と期待されている。また、X線検出器においては、現状はSi(Li)やGeが一般的な材料であるが、CdTe、InSbといった低温で高感度を達成する材料開発に加え、SiCのようなワイドバンドギャップ半導体を用いることで取扱いの簡便性に長けた室温動作X線検出器を開発するという要求がでている。

2. 研究の目的

本研究では、SiC半導体を用いた耐放射線性の粒子検出器及び室温動作X線検出器を開発するうえで必要となる基礎データ、すなわち、SiCダイオードへ放射線が入射することにより発生する電荷の収集効率（Charge

Collection Efficiency: CCE) を調べ、その耐放射線性を明らかにすることを目的とした。そこで、具体的に、以下の(1)~(4)の目標を掲げ研究を展開した。

- (1) アルファ線~重イオン、数 MeV~数百 MeV といった幅広いイオン種、エネルギー範囲で CCE を調べ、CCE が 100%となる SiC 検出器の作製工程を確立する。
- (2) 高エネルギー物理学から要求される Minimum Ionizing Particle (MIP) 粒子検出へと結びつけるため、ベータ線での CCE 測定を行い、検出感度を明らかにする。
- (3) X 線・ガンマ線の検出のための測定系の回路設計・構築を行い、応答特性を明らかにし、実用化への指針を得る。
- (4) 作製した SiC ダイオードへガンマ線等の放射線を照射し、上記(1)~(3)を評価することで耐放射線性を検証する。

3. 研究の方法

六方晶(6H)SiC エピタキシャル基板上に pn ダイオードを作製する。作製した pn ダイオードに、3MeV タンデム加速器またはサイクロトロンからの数 MeV~数百 MeV のエネルギーを持つ様々な重イオンマイクロビームを入射し、単一イオン入射によるイオンビーム誘起過渡電流 (Transient Ion Beam Induced Current: TIBIC) 測定を行う。TIBIC シグナルを解析することで、イオンビーム入射による発生電荷の挙動及び CCE に関する情報を得る。また、放射性同位体を用いた研究では、Am からのアルファ線と X 線、Cs, Sr からのベータ線、Co よりのガンマ線入射による CCE 評価を行う。さらに、ガンマ線、電子線及び陽子線照射により結晶損傷を導入した SiC pn ダイオードについても同様な評価を行い、電荷挙動及び CCE に及ぼす影響を明らかにする。

4. 研究成果

図 1 に p 型エピタキシャル 6H-SiC 基板上に作製した n⁺p ダイオードに 12MeV - Si イオンを入射した時の TIBIC シグナルを示す。図より印加電圧の増加に従い、シグナルのピークが高く、収集時間も短くなるのが分かる。これは、印加電圧の増加により空乏層が伸び、さらに電界強度も大きくなることで解釈できる。TIBIC シグナルを積分することで収集電荷量を見積もることができる。図 2 に 12MeV の酸素 (O)、Si、ニッケル (Ni)、金 (Au) イオンを入射した際の収集電荷量と印加電圧の関係を示す。イオンの飛程(侵入長)の長い O イオン入射の場合が顕著であるが、低印加電圧側では収集電荷量は電圧の増加と共に増加し、ある値以上で飽和することが分かる。これは、低電圧の場合、空乏層(電界領域)がイオンの飛程より短く、空乏層より深い領域で発生した一部の電荷が拡散中に

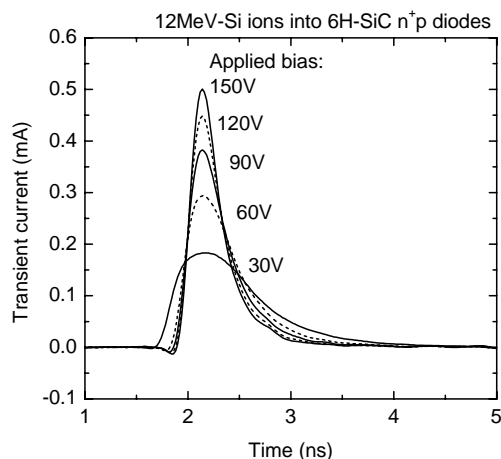


図 1 6H-SiC n⁺p ダイオードに 12MeV - Si イオンを入射した時の TIBIC シグナル。図中に印加した電圧の値を示した。

再結合し、収集に寄与しないためである。印加電圧の増加と共に空乏層も伸び、その結果、収集電荷量も増加する。そして、空乏層長がイオンの飛程より長くなると、全ての発生電荷が電界により収集されるために収集電荷量が飽和したといえる。0 入射の場合、収集電荷量の飽和値は、理想値の 90%以上であり、表面の金属電極や測定系での損失を考えると非常に高い(ほぼ 100%)CCE であると言える。以上より、SiC が検出器として有望な材料であること、今回、ダイオードの n⁺領域形成に用いた 800°C でのリンイオン注入及び 1650°C、Ar 中での 5 分間熱処理は、作製工程として適切であると帰結できる。一方、図 2 から、Si, Ni, Au と重いイオンになるに従い、収集電荷量の飽和値が低下していくことも見出される。0 イオンにおいて高い CCE を観測したことから、この原因は SiC ダイオードの性能で

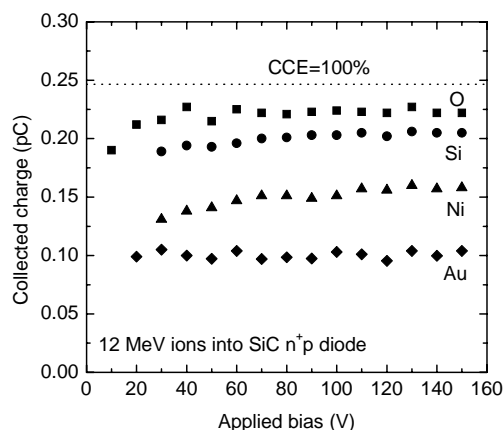


図 2 6H-SiC n⁺p ダイオードに 12MeV の O, Si, Ni, Au イオンを入射した際の収集電荷量と印加電圧の関係。図中に、破線で理想値 (CCE=100%) も併せて示した。

はなく、SiCの物性に由来する本質的な振る舞いであると考えられる。原因を明らかにするため、これらイオンがSiC中に入射した際に発生する電子・正孔対の生成濃度をKobetch及びKatzにより提唱された理論(KK理論)に基づき見積もった。その結果、イオントラックの中心付近では、Auの場合0に比べ100倍程度高濃度である $10^{25}/\text{cm}^3$ オーダーとなることを見出された。このような高濃度電子・正孔対プラズマ中では空乏層内の電界が弱められるとともに再結合確率が増加することが考えられるため、Auger再結合に関する考察を進めた。解析の結果、今回用いた6H-SiCはAmbipolar Auger定数が $1 \times 10^{-29} \text{ cm}^6/\text{s}$ と、SiやGeの報告値である 3×10^{-31} や $1 \times 10^{-31} \text{ cm}^6/\text{s}$ に比べ非常に大きいことを見出され、今回NiやAuの様な重イオンで観測されたCCEの低下が、高濃度プラズマ内での電子・正孔対の再結合に起因すると結論できた。図には示さないが、数百MeV級のKrやXeイオンを用い同様な評価を行ったところ、やはりAuger再結合に由来するCCEの低下が観測された。

n⁺pダイオードとp⁺nダイオードのCCE特性の差異の有無に関する研究も進めた。この研究では、pまたはn型六方晶炭化ケイ素(6H-SiC)エピタキシャル基板上に800°Cでのリンまたはアルミ高温イオン注入及びAr中熱処理(1650または1800°C)を行いn⁺またはp⁺型領域を形成することでn⁺pまたはp⁺n接合ダイオードを作製した。作製したダイオードに最大454MeVのエネルギーを持つO、Si、Ni、Au、N、Ne、Ar、Kr、Xeイオンを入射し、CCEを評価した。その結果、n⁺p及びp⁺nダイオードで有意差は見られず、両者とも検出器への応用が可能であることが判明した。

アルファ線、ベータ線の検出に関する研究を進めた。図3にAmからのアルファ線を用いた6H-SiC n⁺pダイオードの電荷収集評価

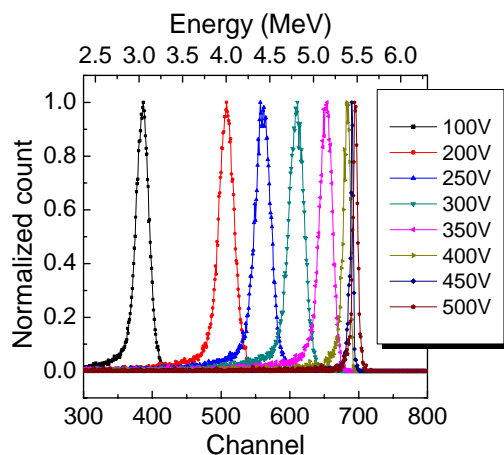


図3 Amからのアルファ線と6H-SiC n⁺pダイオードの電荷収集の関係。図中に印加電圧の値とそれぞれの結果の関係を示す。

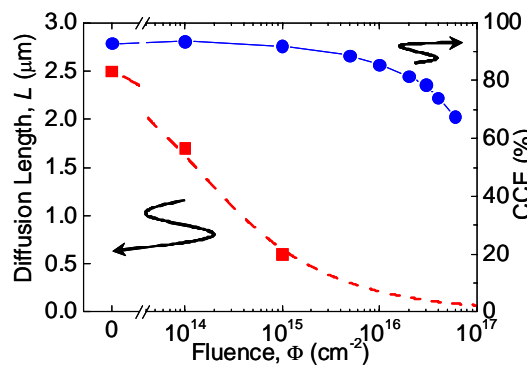


図4 1MeV電子線照射量と6H-SiCダイオードのCCE()及びp型6H-SiC中の少数キャリアの拡散長()の関係。

結果を示す。印加電圧の増加とともに空乏層が伸び、ピークが高エネルギー側にシフトし、450V以上の電圧印加ではAmからのアルファ線のエネルギーである5.48MeVとなり、アルファ線の全量を観測することに成功した。さらに、Srからのベータ線の計測を試みたところ、100チャンネル程度の低エネルギー側にベータ線に起因する僅かなカウントを観測したが、低チャンネル側はノイズが多く、ベータ線のCCEを決定するに至らなかった。ガンマ線計測に関するも同様であり、ノイズレベルが高く計測が行えなかった。このことよりSiCは、室温においてベータ線やガンマ線の検出が可能であるが、その定量化には測定系(アンプの選定、ノイズの低減化)やダイオードの構造設計(エピタキシャル膜の厚膜化やキャリア濃度低減化、電極サイズの大型化等)の見直し等が必要であると言える。

次に損傷効果に関する結果を述べる。ここでは、6H-SiC n⁺pダイオードに⁶⁰Coからのガンマ線、1MeV電子線または65MeV陽子線を照射することで損傷を導入し、0イオン入射を用いたTIBIC測定を行うことでCCEに及ぼす損傷の影響を調べた。結果を図4に示す。図より、1MeV電子線 $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ までの照射ではCCEに低下は見られず初期値と同程度の93%であるが、それ以上の照射ではCCEが低下し始め、 $6 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ 照射後にはCCEは68%まで低下することが分かる。また、CCEのダイオード印加電圧依存性を、拡散とドリフトの効果を考慮して解析することで少数キャリアの拡散長を求めたところ、1MeV電子線照射量の増加に従い減少し、初期値が $2.5 \mu\text{m}$ であるのに対し、 $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ の照射後には $0.5 \mu\text{m}$ となることが明らかとなった。さらに、非イオン化エネルギー損失(Non Ionizing Energy Loss: NIEL)と呼ばれる損傷の指標を用いることでSiCダイオードのCCE低下がスケールできるかという考察も行った。図5に1MeV電子線、ガンマ線、65MeV陽子線照射による

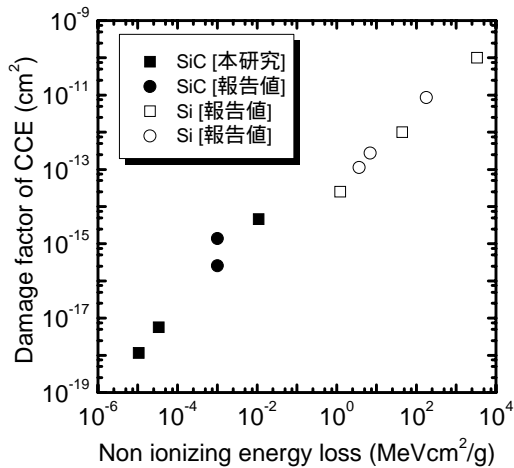


図5 1MeV 電子線、ガンマ線、65MeV 陽子線照射による6H-SiCダイオードのCCEの損傷係数とNIELの関係。比較のためSiの報告値 (S. Onoda et al., Nucl. Instr. Meth. B **206**, 444 (2003).) (I. Nashiyama et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. **40**, 1935 (1993).)及びSiCの報告値 (F. Nava et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. **53**, 2977 (2006)., F. Moscatelli et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. **53**, 1557 (2006).)も併せて示した。

6H-SiCダイオードのCCEの損傷係数とNIELの関係を示す。図にはSiの報告値及び他のSiCの報告値も併せて示した。図から、SiC、Si共に一つの直線関係があり、NIELがCCEの劣化を表す良い指標であることが分かる。さらに、放射線照射によるSiCエピタキシャル膜のキャリア濃度の低下から枯渇係数を求め、同様にNIELによる解析を行ったところ、SiCのキャリア濃度枯渇係数とNIELの関係は、SiだけでなくGe, GaAs, InP, CuInSe₂といった様々な半導体と同一の直線関係であり、NIELにより統一的にスケールリングできることも併せて明かとなった。

以上、今回の研究成果を当初の目標との対比でまとめると、

- (1) アルファ線～重イオン、数MeV～数百MeVといった幅広いイオン種、エネルギー範囲でCCEを調べた結果、アルファ線や0では高いCCEを観測し、今回用いたSiC検出器の作製工程が適当であること、SiCは粒子検出器に応用可能であることが示された。一方、NiやAuのような重イオンではAuger再結合によるCCEの低下が観測され、SiC検出器を実用化する際には、このAuger再結合によるCCE低下も考慮に入れ校正等を行う必要があることが明かとなった。また、n⁺pダイオード、p⁺nダイオードでCCE特性に差異はなく、両者ともに検出器

応用が可能であることも示した。

- (2) ベータ線でのCCE測定を行った結果、明確なシグナルの変化を観測し、ベータ線を検出していることは確認できたが、ノイズ等の問題で検出感度の定量には至らなかった。これより、SiCによる室温でのベータ線検出器の開発は可能であるが、そのためには測定系や素子構造の改良が必要といえる。
- (3) X線・ガンマ線の検出のための測定系の回路設計・構築を試みたが、検出には至らなかった。上記ベータ線と同様であるが、アンプ等の測定回路系及び素子構造設計を改良することで検出が可能となると考える。
- (4) 作製したSiCダイオードへ、ガンマ線、電子線及び陽子線を照射しCCEの低下を評価した結果、1MeV電子線を6x10¹⁶/cm²照射した後も68%のCCEを示し、SiCの高い耐放射線性を実証した。また、CCEの損傷係数及びキャリア濃度の枯渇係数が、他の半導体材料と同様にNIELによりスケールリングできることも明かとなった。

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14件)

T. Ohshima, N. Iwamoto, S. Onoda, T. Kamiya, K. Kawano, "Comparative Study of Transient Current Induced in SiC p⁺n and n⁺p Diodes by Heavy Ion Microbeams", Nucl. Instr. Meth. B in press 査読有.

S. Onoda, N. Iwamoto, T. Hirao, K. Kawano, K. Kojima, T. Ohshima, "Reduction of Effective Carrier Density and Charge Collection Efficiency in SiC Devices due to Radiations", American Institute of Physics Conference Proceedings **1099** (2009) pp. 1010-1013 査読有.

S. Onoda, N. Iwamoto, M. Murakami, T. Ohshima, T. Hirao, K. Kojima, K. Kawano, I. Nakano, "Charge Collection Properties of 6H-SiC Diodes by Wide Variety of Charged Particles up to Several Hundreds MeV", Materials Science Forum **615-617** (2009) pp. 861-864 査読有.

S. Onoda, T. Ohshima, T. Hirao, S. Hishiki, N. Iwamoto, K. Kojima, K. Kawano, "Transient Response to High Energy Heavy Ions in 6H-SiC n⁺p Diodes", Materials Science Forum **600-603** (2009) pp. 1039-1042 査読有.

N. Iwamoto, S. Onoda, S. Hishiki, T. Ohshima, M. Murakami, I. Nakano, K.

Kawano, "Degradation of Charge Collection Efficiency for 6H-SiC Diodes by Electron Irradiation", Materials Science Forum **600-603** (2009) pp 1043-1046 査読有.

T. Ohshima, S. Onoda, N. Iwamoto, K. Kojima, K. Kawano, "NIEL Analysis of Charge Collection Efficiency in Silicon Carbide Diodes Damaged by Gamma-Rays, Electrons and Protons", Proc. the 8th International Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Applications (2008) pp.175-178 査読無.

S. Onoda, T. Ohshima, T. Hirao, K. Mishima, S. Hishiki, N. Iwamoto, K. Kawano, "Impact of Auger Recombination on Charge Collection of a 6H-SiC Diode by Heavy Ions ", IEEE Transactions on Nuclear Science **54** (2007) pp. 2706-2713 査読有.

S. Onoda, T. Ohshima, T. Hirao, K. Mishima, S. Hishiki, N. Iwamoto, K. Kojima, K. Kawano, "Decrease of Charge Collection due to Displacement Damage by Gamma Rays in a 6H-SiC Diode", IEEE Transactions on Nuclear Science **54** (2007) pp. 1953-1960 査読有.

S. Onoda, N. Iwamoto, T. Ohshima, T. Hirao, K. Kawano, "Decrease in Ion Beam Induced Charge of 6H-SiC Diodes", Proc. of the 26th Sympo. on Mater. Sci. and Engineer. Res. Center of Ion Beam Tech. Hosei Univ. (2007) pp.35-40 査読無

N. Iwamoto, T. Ohshima, S. Onoda, S. Hishiki, M. Murakami, I. Nakano, K. Kawano, "Charge Collection Efficiency of 6H-SiC Diodes Damaged by Electron Irradiation", Proc. of the 26th Sympo. on Mater. Sci. and Engineer. Res. Center of Ion Beam Tech. Hosei Univ. (2007) pp.27-30 査読無.

T. Ohshima, T. Satoh, M. Oikawa, S. Onoda, S. Hishiki, T. Hirao, T. Kamiya, T. Yokoyama, A. Sakamoto, R. Tanaka, I. Nakano, G. Wagner, H. Itoh, "Degradation of Charge Collection Efficiency Obtained for 6H-SiC n⁺p Diodes Irradiated with Gold Ions", Materials Science Forum **556-557** (2007) pp. 913-916 査読有.

S. Onoda, T. Hirao, J. S. Laird, K. Mishima, K. Kawano, H. Itoh, "Transient Currents Generated by Heavy Ions With Hundreds of MeV", IEEE Transactions on Nuclear Science **53** (2006) pp.3731-3737 査読有.

S. Onoda, T. Ohshima, T. Hirao, S. Hishiki, K. Mishima, N. Iwamoto, T. Kamiya, K. Kawano, "Analysis of Transient Current in SiC Diodes Irradiated with MeV Ions", Proceedings of 7th International Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Application (2006) pp.115- 査読無.

N. Iwamoto, T. Ohshima, T. Satoh, M. Oikawa, S. Onoda, S. Hishiki, T. Hirao, T. Kamiya, T. Yokoyama, A. Sakamoto, R. Tanaka, I. Nakano, G. Wagner, H. Itoh, K. Kawano, "Observation of Charge Collection Efficiency of 6H-SiC n⁺p Diodes Irradiated with Au-Ions", Proceedings of 7th International Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Application (2006) pp.185- 査読無.

[学会発表](計15件)

T. Ohshima, S. Onoda, N. Iwamoto, K. Kojima, K. Kawano, "NIEL Analysis of Charge Collection Efficiency in Silicon Carbide Diodes Damaged by Gamma-Rays, Electrons and Protons", The 8th International Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Applications (RASEDA), 2008年12月15-17日, Tsukuba (Japan).

S. Onoda, N. Iwamoto, M. Murakami, T. Ohshima, T. Hirao, K. Kojima, K. Kawano, I. Nakano, "Charge Collection Properties of 6H-SiC Diodes by Wide Variety of Charged Particles up to Several Hundreds MeV", 7th European Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ECSCRM), 2008年9月7-11日, Barcelona (Spain)

小野田忍、大島武、岩本直也、平尾敏雄、児島一聡、河野勝泰、「数百 MeV 級高エネルギー重イオンによる 6H-SiC ダイオードの電荷収集効率の測定」, 2008 年秋季第 69 回応用物理学会学術講演会、2008 年 9 月 2 - 5 日、春日井 (日本)。

S. Onoda, N. Iwamoto, T. Hirao, K. Kawano, K. Kojima, T. Ohshima, "Reduction of Effective Carrier Density and Charge Collection Efficiency in SiC Devices due to Radiations ", 20th International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry (CAARI), 2008年8月10-15日, Fort Worth (USA)。

T. Ohshima, N. Iwamoto, S. Onoda, T. Kamiya, K. Kawano, "Comparative Study

of Transient Current Induced in SiC p⁺n and n⁺p Diodes by Heavy Ion Microbeams", 11th International Conference on Nuclear Microprobe Technology and Applications (ICNMTA), 2008年7月20 - 25日, Debrecen (Hungary).

N. Iwamoto, T. Ohshima, S. Onoda, S. Hishiki, M. Murakami, I. Nakano, K. Kawano, 「電子線照射により損傷を導入した 6H-SiC ダイオードの電荷収集効率」第 26 回法政大学イオンビーム工学研究所シンポジウム、2007年12月13日、東小金井 (日本).

小野田忍, 岩本直也, 大島武, 平尾敏雄, 河野勝泰, 「6H-SiC ダイオードにおけるイオンビーム誘起電荷量の低下」第 26 回法政大学イオンビーム工学研究所シンポジウム、2007年12月13日、東小金井 (日本).

N. Iwamoto, S. Onoda, S. Hishiki, T. Ohshima, M. Murakami, I. Nakano, K. Kawano, "Degradation of Charge Collection Efficiency for 6H-SiC Diodes by Electron Irradiation", Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2007, 2007年10月14-19日, Otsu (Japan).

S. Onoda, T. Ohshima, T. Hirao, S. Hishiki, N. Iwamoto, K. Kojima, K. Kawano, "Transient Response to High Energy Heavy Ions in 6H-SiC n⁺p diodes", Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2007, 2007年10月14-19日, Otsu (Japan).

岩本直也, 小野田忍, 菱木繁臣, 大島武, 村上允, 中野逸夫, 河野勝泰, 「電子線照射された 6H-SiC pn ダイオードの電荷収集効率」2007年(平成19年)秋季第68回応用物理学学会学術講演会、2007年9月4-8日、北海道 (日本).

小野田忍, 平尾敏雄, 菱木繁臣, 大島武, 「高エネルギー重イオンによる TIBIC 測定技術の開発 II」2007年(平成19年)秋季第68回応用物理学学会学術講演会、2007年9月4-8日、北海道 (日本).

S. Onoda, T. Ohshima, T. Hirao, K. Mishima, S. Hishiki, N. Iwamoto, K. Kojima, K. Kawano, "Decrease of Charge Collection Due to Displacement Damage by Gamma Rays in a 6H-SiC Diodes", 2007 IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference, 2007年7月23-27日, Hawaii (USA).

S. Onoda, T. Ohshima, T. Hirao, S. Hishiki, K. Mishima, N. Iwamoto, T. Kamiya, K. Kawano, "Analysis of Transient Current in SiC Diodes

Irradiated with MeV Ions", 7th International Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Application, 2006年12月, Takasaki (Japan).

N. Iwamoto, T. Ohshima, T. Satoh, M. Oikawa, S. Onoda, S. Hishiki, T. Hirao, T. Kamiya, T. Yokoyama, A. Sakamoto, R. Tanaka, I. Nakano, G. Wagner, H. Itoh, K. Kawano, "Observation of Charge Collection Efficiency of 6H-SiC n⁺p Diodes Irradiated with Au-Ions", 7th International Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Application, 2006年12月, Takasaki (Japan)

S. Onoda, T. Hirao, J. S. Laird, K. Mishima, K. Kawano, H. Itoh, "Transient Currents Generated by Heavy Ions With Hundreds of MeV", 2006 IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference, 2006年7月17-21日, Florida (USA).

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: 5 0 3 5 4 9 4 9

(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: 3 0 4 1 4 5 6 9

(3) 連携研究者

伊藤 久義 (ITOH HISAYOSHI)

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・研究主席
研究者番号: 4 0 3 5 4 9 3 0

神谷 富裕 (KAMIYA TOMIHIRO)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・放射線高度利用施設部・研究主幹
研究者番号: 7 0 3 7 0 3 8 5

佐藤 隆博 (SATOH TAKAHIRO)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・放射線高度利用施設部・研究職
研究者番号: 1 0 3 7 0 4 0 4

中野 逸夫 (NAKANO ITSUO)

岡山大学・自然科学研究所・教授

研究者番号: 9 0 1 3 3 0 2 4