

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 26 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25790076

研究課題名(和文)イオン誘起微小電荷による炭化ケイ素半導体デバイスの破壊機構解明

研究課題名(英文)Single Event Burnout Mechanisms in SiC devices

研究代表者

牧野 高紘(Makino, Takahiro)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 量子ビーム応用研究センター・研究員

研究者番号：80549668

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：炭化ケイ素(SiC)は、その優れた物性から耐放射線性デバイスとしての応用が期待されており、そのためには、SiCデバイスのイオン照射効果を明らかにする必要がある。本研究では、SiCデバイスのイオン誘起破壊メカニズムの解明に向け、n型六方晶(4H)SiC-SBDのエピタキシャル層厚とSBD内でのイオンの飛程の関係に注目し、イオン誘起電荷量測定と数値計算を行った。その結果、予想通りイオン飛程がエピタキシャル層厚と同等の場合に、イオン誘起電荷のインパクトイオン化が促進されることを明らかにし、イオン誘起破壊現象のメカニズムの一端を解明することに成功した。

研究成果の概要(英文)：The charge enhancement in SiC-Schottky Barrier Diodes (SBDs) with different epi-layer thicknesses under the condition of the single-species ion irradiation was simulated to find out the mechanism of heavy-ion-induced anomalous charge collection in SiC-SBDs. The value of ion induced charge depended on the thickness of epitaxial-layer in the SBDs. The simulation result suggests that the impact ionization is one of the key effects to lead ion induced charge enhancement.

研究分野：放射線工学

キーワード：炭化ケイ素 SiC 耐放射線性 シングルイベント

1. 研究開始当初の背景

単一の放射線(イオン)が半導体デバイスに入射することで発生する種々の異常現象(シングルイベント効果)が、超高エネルギーイオンが飛び交う宇宙空間で使用する半導体デバイスにおいて問題視されてきた。近年、地上においても、半導体デバイスの微細化・パワー化に伴って、天然由来の中性子線がデバイス材料中に誘起するイオンによるシングルイベント効果が無視できなくなっている。そのため、宇宙用・地上用に関わらずほとんどの半導体デバイスにおいて耐放射線性向上が求められている。メモリ・論理LSI(Large Scale Integration)は情報を扱う上に動作電圧が低いため放射線による攪乱に敏感で、シングルイベント効果に対する多くの研究がなされ、数々の構造的・回路的対策がとられている。一方、パワーデバイスは、メモリやLSIに比べて扱う電力が大きく放射線攪乱に鈍感、極端な微細化が必要ない等の理由から、メモリ等のような対策は特にとられておらず、使用電流・電圧等を抑えることでシングルイベント効果(特にイオン誘起破壊現象)へのリスクマージンを確保している。実際、パワーデバイスのイオン誘起破壊現象のリスクは、使用電圧に比例して大きくなること示唆されていた。

パワーデバイスは、自動車・鉄道等の高い信頼性が要求される箇所に多く用いられ、高信頼性化も併せて求められる。しかし、前述の通りパワーデバイスの高電圧化は、シングルイベント効果によるデバイス破壊のリスクマージンを減らすことになり、信頼性の低下を招く。つまり、今後のパワーエレクトロニクスの発展のためには、パワーデバイスのイオン誘起破壊現象のメカニズム解明とその対策が必須である。

パワーデバイスの高性能化のために、優れた物性(ワイドバンド、高絶縁破壊電界、高熱伝導率等)を有する炭化ケイ素(SiC)を用いた超低損失パワーデバイスの実用化が進んでいる。加えてSiCは、その優れた物性から耐放射線デバイスへの応用も期待されている。実際に、SiCデバイスの半導体検出器応用という観点から、ガンマ線に対して耐放射線性試験が行われ、Siに比べて高い耐放射線性(ガンマ線)を示すことが明らかになっており、イオン誘起破壊現象においても、その耐放射線性が期待されていた。しかし、これまでSiCパワーデバイスのイオン誘起破壊現象に関しては、内部構造が不明な市販のデバイスを用いた試験結果のみで、SiCパワーデバイスの破壊メカニズムの本質には踏み込まず、観測された結果に関する現象論的な議論しかなされていなかった。

2. 研究の目的

申請者はSiCショットキーダイオードのイオン誘起破壊現象に関して研究を行い、従来報告されていない、SiCパワーデバイスのイオン誘起破壊の前兆現象を初めて詳細に観測することに成功していた。当初、このメカニズムは明らかにはなっていたが、実験に用いたデバイスは共同研究機関で作製されたものであり、そのデバイス構造を細部まで把握できる。そこで、デバイス構造を操作した上で測定を行うことで、これまで知る事のできなかったイオン誘起破壊現象の一つ一つの物理メカニズムを明らかにし、デバイス設計へフィードバックすることで耐放射線性の向上が実現し、パワーエレクトロニクスの飛躍的なエネルギー効率向上が実現するのではないかと考え、実験とシミュレーションによるSiCパ

ワーデバイスのイオン誘起破壊現象のメカニズム解明を目的とした。

3. 研究の方法

パワーデバイスの中で基礎構造を持つショットキーダイオードに注目し、1V~1kVまでのデバイス印加電圧とイオン誘起微小電荷のデバイス内での増幅率の関係を明らかにする。加えて、エネルギーの異なるイオンを用いて、初期にデバイス内に生成される電荷量とその増幅率の関係も明らかにする。これら破壊にいたるまでのイオン誘起微小電荷の増幅挙動を高精度で観測すると同時に、異なる膜厚のエピタキシャル層を用いてデバイスを作製し、種々の現象のデバイス構造依存性の確認を行う。これらの結果とデバイスシミュレーションの結果からパワーデバイスが破壊に至るまでの放射線誘起微小電荷の増幅メカニズムを完全解明する。

4. 研究成果

炭化ケイ素(SiC)は、その優れた物性から耐放射線性デバイスとしての応用が期待されており、そのためには、SiCデバイスのイオン照射効果を明らかにする必要がある。我々は、これまで入射イオンがSiCショットキーダイオード(SBD)内に理論的に誘起する電荷量を越えた、過剰な電荷収集を観測していたが、その原因についてはよくわかっていなかった。本研究では、SiCデバイスのイオン誘起破壊メカニズムの解明に向け、n型六方晶(4H)SiC-SBDのエピタキシャル層厚とSBD内でのイオンの飛程の関係に注目し、イオン誘起電荷量測定と数値計算を行った。電荷量測定では、異なるエピタキシャル層厚(25ミクロンと69ミクロン)を持つ基板それぞれの上に作製したSBDに、加速器を用いて322MeVのKrイオンを照射し、SBD内に誘起される電荷量の測定を行った。

イオンのSBD中での飛程は27ミクロンである。照射時SBDは逆バイアス状態に保たれており、カソードに収集される電荷量を測定した。どちらのSBDの場合も400 V印加時には、理論値を越えた過剰な電荷収集が観測されており、イオン誘起電荷が増幅されていた。このときの、SBD内の電界強度は、どちらのエピタキシャル層においてほぼ同じ(約0.18 MV/cm)であるが、収集電荷量の増幅率を比較すると、25ミクロンのエピタキシャル層内に誘起される電荷は、69ミクロンのエピタキシャル層内に誘起される電荷より大きく増幅されることがわかった。このことより、エピタキシャル層厚とイオン飛程の関係が電荷の増幅・過剰収集を左右するパラメータであると推察し、数値計算を行った。その結果、予想通りイオン飛程がエピタキシャル層厚と同等の場合に、イオン誘起電荷のインパクトイオン化が促進されることを明らかにし、イオン誘起破壊現象のメカニズムの一端を解明することに成功した。

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 2 件)

Epitaxial layer thickness dependence on heavy ion induced charge collection in 4H SiC Schottky Barrier Diodes, T. Makino, S. Onoda, N. Hoshino, H. Tsuchida, T. Ohshima, Mater. Sci. Forum **858** (2016) 753-756, 査読有り
Ion-Induced Anomalous Charge Collection Mechanisms in SiC Schottky Barrier Diodes, T. Makino, M. Deki, S. Onoda, N. Hoshino, H. Tsuchida, and T. Ohshima,

Mater. Sci. Forum **821-823** (2015)
575-578 , 査読有り

〔学会発表〕(計 2 件)

Epitaxial layer thickness dependence on heavy ion induced charge collection in 4H SiC Schottky Barrier Diodes, T. Makino, S. Onoda, N. Hoshino, H. Tsuchida, T. Ohshima, 16th International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM2015), October 4-9, 2015, Giardini Naxos, Italy.
Ion-Induced Anomalous Charge Collection Mechanisms in SiC Schottky Barrier Diodes, T. Makino, M. Deki, S. Onoda, N. Hoshino, H. Tsuchida, T. Ohshima, European Conference on Silicon Carbide & Related Materials, (September, 21-26, 2014France)

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

出願年月日 :

国内外の別 :

取得状況(計 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

取得年月日 :

国内外の別 :

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究代表者

牧野 高紘 (MAKINO, Takahiro)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 量子ビーム応用研究センター・研究員

研究者番号 : 80549668

(2)研究分担者

()

研究者番号 :

(3)連携研究者

()

研究者番号 :