

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05111

研究課題名(和文)炭化ケイ素MOSFETにおけるイオン誘起微小電荷の二次元的収集過程の解明

研究課題名(英文)Study of ion induced charge collection process in SiC MOSFETs

研究代表者

牧野 高紘(MAKINO, Takahiro)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 先端機能材料研究部・主任研究員(定常)

研究者番号：80549668

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：炭化ケイ素(SiC)製-金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ(MOSFET)にイオンが入射することで誘起される破壊現象解明のため、SiC-MOSFET内に入射するイオンが誘起する電荷の挙動解明を目的とした。イオン誘起電荷量のデバイス構造依存性の観測結果の解析を行い、デバイス破壊に支配的なパラメータの推定を行った。その結果より、イオンのLET(Linear Energy Transfer)と、デバイス構造が支配的であると考えられる結果が得られた。破壊されたデバイスの破壊痕の断面観察を行い、それらもデバイス構造に依存していることを確認し、今後の研究指針を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

イオン誘起電荷量のデバイス構造依存性の観測結果の解析を行い、デバイス破壊に支配的なパラメータの推定を行うことで、イオンのLET(Linear Energy Transfer)と、デバイス構造が支配的であると考えられる結果が得られた。破壊されたデバイスの破壊痕の断面観察を行い、それらもデバイス構造に依存していることを確認し、今後の研究指針を得た。本研究結果は、半導体デバイスのイオン耐性向上に寄与する結果であり、最先端・高効率半導体デバイスの宇宙応用を大きく推進するものである。

研究成果の概要(英文)：Device structure dependence of ion induced charge collection processes in SiC MOSFETs were studied. Device structure and LET (Linear Energy Transfer) were shown as key factors of the destructive charge collection behavior in SiC MOSFETs. Device structure dependence of the charge collection was confirmed by physical cross-section observations of destructive charge path.

研究分野：宇宙工学

キーワード：SiC シングルイベント

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 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)は、超高エネルギーイオンが飛び交う宇宙空間における人工衛星などで問題視されてきた。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懸念されている。そのため、宇宙・地上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。微細な集積回路は、動作電圧が低いため放射線による攪乱に敏感なうえ情報を扱うために、シングルイベント効果に対する多くの研究がなされ、数々の構造的対策がとられてきた。一方、パワーデバイスにおいては、集積回路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ため、特別な放射線対策はとられておらず、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が知られていた。パワーデバイスを高効率で使用するには、デバイスの最大使用可能電力で使用することが求められるが、前述の通り高電圧化は、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、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。

従来の Si 半導体材料に比べ、優れた物性(ワイドバンドギャップ、高絶縁破壊電界等)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が実現しており、一部の自動車や鉄道等へ搭載されている。また 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-金属酸化膜電界効果トランジスタ(MOSFET)は、Si に比べて高い耐放射線性(ガンマ線)を示すことを示してきた。これまでの予備研究において、SiC ダイオードでのイオン誘起電荷を実験的に観測することで、破壊の前兆であるイオン誘起電荷の異常な増幅現象を発見し、さらにこの増幅は、電荷が電界によって輸送される際の、インパクトイオン化によるものであることをデバイスシミュレーションによって明らかにしてきた。しかし、パワーエレクトロニクスの信頼性向上のためには、ダイオードのような一次元の電界分布における電荷収集ダイナミクスだけでなく、縦型 MOSFET のような二次元の電界分布内における、より複雑なイオン誘起電荷の輸送過程を考え、解明する必要がある。

### 2. 研究の目的

これまで独自に作製した単純な構造のダイオードに対し、多様なエネルギーを持つイオンを照射することで、ダイオードのイオン入射方向厚さと、イオンの進入長、エネルギーが、電荷収集に与える影響を明らかにしてきた。また、それらの結果をデバイスシミュレーションによって再現することで、一つ一つの物理現象を確実に解明している。これらの技術を用いて、実験とシミュレーションにより、これまでより複雑な SiC-MOSFET のイオン誘起破壊現象のメカニズム解明を提案することを目的としている。

### 3. 研究の方法

内部構造が既知の SiC 縦型 MOSFET において、ソース・ドレイン・ゲートそれぞれの電圧条件をパラメータとし、重イオン照射を行い各電極へ収集される電荷量からイオン誘起微小電荷の増幅と印加電圧との関係を明らかにする。また、オフ状態の MOSFET において、ドレインバイアスとイオンエネルギーをパラメータとしたイオン誘起破壊耐性のデバイス構造依存性を明らかにする。増幅現象や破壊現象に支配的な物理モデルの探索を行う。

### 4. 研究成果

同一のドーピングプロファイルを持ちながら異なる 2 種類のゲート構造を持つ産総研製 SiC 縦型 MOSFET (プレーナー型: IEMOSFET, トレンチゲート型: IEUMOSFET) に対し、ソース-ゲート間をショートした上で接地し、電荷敏感型プロンプト経路でドレインに DC 電圧を印加したうえで、一定数のイオンを照射し、ドレインに収集されるイオン誘起電荷量を測定した。その結果、一つのイオンが誘起する電荷の量は、一定エネルギーのイオンに誘起されるにもかかわらず、広い分布を持つことがわかった。また、低エネルギーイオン照射においては、電荷量分布の大きなデバイス構造依存性は見られなかったが、高エネルギーイオンの照射においては、2 つのデバイスにおいて著しい違いが観測された。デバイス構造が起因となる、電荷収集物理プロセスの存在を示唆していることを明らかにした。

また、IEMOSFET, IEUMOSFET に対し、ソース-ゲート間をショートした上で接地し、ドレインに DC 電圧を印加したまま、 $2.5 \times 10^5$  ion/cm<sup>2</sup> のイオンを照射した。照射前後、照射中のドレイン端に流れるリーク電流をハイパワー SMU でモニタし、リーク電流が 1mA に達した際の電圧を破壊電圧と定義した。本実験では上記 MOSFET の他に、WOLFSPEED(CREE)製 CPM2-1200-0080B 製 1.2 kV 級 MOSFET についても測定した。すべてのチップ面積はほぼ等しい。重イオンは量研・放医研のシンクロトロン(HIMAC)からの Xe 35 GeV を照射した。

CPM2-1200-0080B と IEMOSFET においては 600V 以下で破壊が発生した。一方、IEUMOSFET においては 650V 以上までの耐久性を示した。この点からも、ゲート構造依存性を確認し、また IEUMOSFET のイオン誘起破壊耐性における優位性を明らかにした。これらの、被破壊デバイスの

破壊痕の断面観察を行ったところ、明らかな破壊箇所と破壊形状の違いを発見し、デバイス構造が起因となる、イオン誘起破壊プロセスの存在を明らかにするに至った。

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 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Takahiro Makino, Shuhei Takano, Shinsuke Harada, Yasuto Hijikata, and Takeshi Ohshima
2. 発表標題 Gate Structure Dependence of Charge Collection and Single Event Burnout Tolerance for SiC MOSFETs
3. 学会等名 IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高野修平、牧野 高紘、原田 信介、児島 一聡、土方 泰斗、大島 武
2. 発表標題 SiCパワー-MOSFETにおける重イオン誘起電荷収集のデバイス構造依存性
3. 学会等名 第78回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高野 修平、牧野 高紘、原田 信介、土方 泰斗、大島 武
2. 発表標題 トレンチゲート型SiC-MOSFETにおける放射線誘起破壊現象の物理過程探索と耐性評価
3. 学会等名 先進パワー半導体分科会 第4回講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 牧野 高紘、原田 信介、大島 武
2. 発表標題 量産SiC-MOSFETにおける超高エネルギーイオン誘起破壊耐性の評価
3. 学会等名 先進パワー半導体分科会 第6回講演会
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----