

平成 30 年 5 月 29 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13410

研究課題名(和文) レーザー駆動量子ビーム照射場を用いた半導体デバイス用宇宙線影響評価手法の開発

研究課題名(英文) Development of an evaluation method of space radiation effects on semiconductor devices using laser acceleration charged-particles

研究代表者

渡辺 幸信 (Watanabe, Yukinobu)

九州大学・総合理工学研究院・教授

研究者番号：30210959

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：レーザー加速粒子ビームを宇宙機搭載電子デバイスの宇宙線影響研究に応用することを目指し、レーザー加速イオンの計測システムと半導体素子の照射影響シミュレーション手法の開発を行った。加速イオンの計測・診断用にトムソンパラボラ分光器とイメージングプレート(IP)を組み合わせたエネルギー分布計測系を設計・製作し、関西光科学研究所J-KAREN-P施設において発生イオンのエネルギー分布測定に適用した。また、機械学習法を用いたIP画像データ解析用自動イオン種分類法を開発した。さらに、PHITSコードを用いた照射影響シミュレーション手法が、メモリ素子の陽子誘起ビット情報反転率の推定に適用できることを示した。

研究成果の概要(英文)：In order to apply multiple charged-particles generated by laser acceleration to the study of radiation effects on space electronics, we have developed a measuring system of laser accelerated ions and a simulation method of irradiation effects on semiconductor devices. A Thomson parabola imaging spectrometer with Fujifilm imaging plates (IPs) was designed and developed for the diagnosis of laser accelerated charge particles. The spectrometer was used to measure the energy spectra of generated ions from a laser irradiated solid target at the J-KAREN-P laser facility in Kansai Photon Science Institute. For the IP image data analysis, an automatic ion-identification method with a machine learning technique was newly developed and successfully applied. Moreover, it was demonstrated that the proposed method of simulating irradiation effects on semiconductor devices with the PHITS code is applicable to the estimation of proton-induced single-event upset rates in memory devices.

研究分野：量子ビーム科学

キーワード：レーザー駆動イオン加速 宇宙線環境 半導体デバイス 照射効果 トムソンパラボラ分光器 イメージングプレート 機械学習 粒子・重イオン輸送シミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙空間には様々なエネルギーを持った大量の高エネルギー宇宙線が存在することから、宇宙機のミッション達成には宇宙線による搭載機器の誤動作頻度や寿命の予測や耐放射線性に優れた機器の開発が課題である。過酷な宇宙線環境下における電子デバイスの劣化や誤動作機構を解明し、その対策を講ずるためには、高エネルギー陽子や重イオン、電子、それに X・γ 線が混在した宇宙線環境を模擬できる地上実験設備が必要不可欠となる。これまでは、宇宙機器用の電子デバイスに対し単独の粒子加速器や γ 線照射場を用いた加速試験が行われてきたが、多種放射線を複数同時照射して複合照射効果を系統的に調べる研究は殆ど進んでいない。

一方、近年の極短パルス高ピーク出力レーザー技術の目覚ましい進歩により、レーザー駆動量子ビーム生成の技術が大きく進展しつつある。従来型加速器にない高エネルギー電子、イオン、γ 線を極短時間に同時に試料に照射でき、宇宙機器用デバイス開発研究者によって切望されていた宇宙環境模擬、即ち複合量子ビームの同時利用の可能性が拓けてきた。一方で、このような環境を利用して太陽電池の特性劣化や半導体デバイスの誤動作・破壊を正確に評価する技術はこれまで開発された例は殆ど無い。この革新的なレーザー駆動複合量子ビーム場を宇宙機搭載デバイスの影響評価に有効利用するためには、早期に関連基礎研究を開始する必要がある。

### 2. 研究の目的

過酷な宇宙線環境下における電子デバイスの劣化や誤動作機構を解明するためには、高エネルギー陽子やイオン、電子、それに X・γ 線が混在した宇宙線環境を模擬できる地上実験設備が必要である。本研究では、極短パルス高ピーク出力レーザーの最先端技術に基づくレーザー加速多種イオンビーム照射場を宇宙機搭載電子デバイスの宇宙線影響評価へ応用することを提案する。極短パルス高ピーク出力レーザーの性能向上よりコンパクトな実験施設の建設が可能となるために、宇宙線環境の模擬照射場として将来有望となることが期待される。

そこで、本研究ではレーザー加速ビーム照射場の特性評価に必要な発生放射線の基礎データを取得し、必要となる複合照射下での半導体デバイス誤動作シミュレーション手法を開発することを目的とする。

### 3. 研究の方法

レーザー加速により生成される量子ビーム複合照射場を用いた放射線照射効果の評価技術の確立を目指し、1) レーザー駆動複合量子場の特性評価、および 2) 半導体デバイス誤動作シミュレーション手法の開発を行った。

#### 1) 量子科学技術研究開発機構・関西光科学

研究所 J-KAREN を用いたレーザー駆動量子場発生装置[1]を使用し、量子ビーム照射場に存在する電子やイオンのフラックスやエネルギー分布等の基礎データを測定する。本研究では、必要となる計測装置の開発に主眼を置いた。

2) 粒子・重イオン輸送モンテカルロコード PHITS[2]をベースにして、半導体デバイス中の各種粒子の挙動をシミュレーションし、イオン・電子の荷電粒子ビームを半導体材料に照射した際のエネルギーや電荷付与量を推定するための照射効果シミュレーション手法を開発した。

### 4. 研究成果

#### 1) レーザー加速荷電粒子の計測装置開発

研究期間が J-KAREN のアップグレード期間と重なったため、主に発生イオンと電子の計測系の開発研究を実施した。ここでは、イオン計測系開発の成果について報告する。

アップグレード後の J-KAREN-P 実験施設での実験を想定し、生成イオン(陽子及び重イオン)のオンライン測定用トムソンパラボラ型スペクトロメータ(TP)の開発研究を行った。図1に今回開発した TP によるイオン計測システムの模式図を示す。

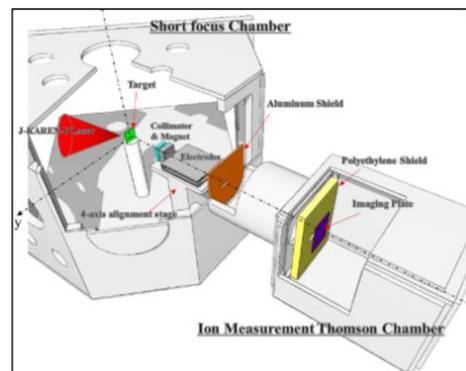


図1 TPを用いたイオン計測システム

TP 中の磁場発生にはピーク磁場強度 0.78 T、領域長さ 5 cm のネオジウム磁石を使用し、電場の発生には最大 20 kV / 1.5 cm の電場強度、領域長さ 30 cm のアルミ電極を使用した。磁石後方 135.6 cm 地点に Fuji film 社製のイメージングプレート(IP)を設置し、パラボラ軌道を検出する。IP を専用スキャナーで読み出し、PSL-陽子個数換算式に従って、パラボラ軌跡上の PSL 値から陽子個数に変換し、陽子エネルギー分布を導出する。

J-KAREN-P を用いて、TP 性能評価のテスト実験を行った。波長~800 nm、集光強度  $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup>、パルス幅 30 fs (FWHM) のレーザーを照射したポリイミドターゲットからの放出陽子エネルギー分布の測定に成功し、TP が設計通りに動作することが確認できた。IP で測定したイオン飛跡の一例を図2に示す。本テストデータから求めたエネルギー分布は連続分布で、最大エネルギー約 24 MeV であった。

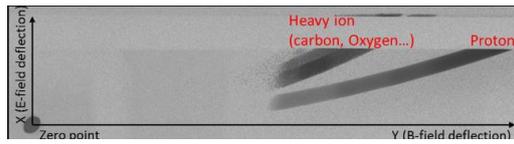


図2 IPで計測されたパラボラ軌道  
(色の濃淡がPSL値の違いを示す。)

最終年度には、IP発光解析モデルに基づく機械学習法による自動イオン分類法を新規開発した。放射線医学総合研究所 HIMAC 施設にて、C及びXeイオンのIP照射実験を行い、提案した発光モデル式の妥当性やパラメータの決定を行った。また、測定したIP輝度分布からイオン種を同定するために機械学習法による自動イオン分類法を適用し、その有効性を実証した。別途開発した電子エネルギー分布計測手法と合せ、レーザー加速荷電粒子ビーム照射場の特性評価用測定システムの基盤を構築できた。

## 2) 半導体デバイス誤動作シミュレーション手法の開発

まず、PHITS[2]を用いた電荷付与過程のシミュレーションを行った。シリコン単体に単一エネルギーのイオン(特に陽子)を単独で照射した場合を計算し、それぞれの応答(付与エネルギー分布)を調査した。また宇宙環境下での陽子や電子のエネルギー分布情報入手し、カバーすべきエネルギー範囲を検討した。

その後、半導体デバイス誤動作シミュレーションのために、PHITSによる電荷付与計算と付与電荷輸送に対する簡易的な有感体積(SV)モデルを組み合わせたシミュレーション手法[3]を適用した。陽子に対して、単色エネルギーによる測定データに見られる入射エネルギー依存性を再現できることを確認し、J-KAREN-Pで測定された陽子の連続エネルギー分布(最大エネルギー約40MeV)を入力して、ソフトエラー率の計算を実施した。

65nm設計ルールのSRAM素子を想定した場合の計算結果を図3に示す。ビット反転のしきい臨界電荷量 $Q_c$ を横軸に反転確率(任意単位)で縦軸に表す。 $Q_c$ が小さい領域では入射陽子の直接電離による影響が効いており、 $Q_c$ が大きい領域は、核反応で生成したHeイオンや反跳重イオンの影響が支配的になることが分かった。想定したSRAMの $Q_c$ は1fC以下と考えられるので、誤動作を引き起こす素過程は直接電離が支配的と予想される。今後はさらに入射エネルギー範囲を広げたシミュレーションも必要である。

以上の検討結果を踏まえ、レーザー駆動複合量子ビーム照射場に対してPHITS+SVモデルによる半導体デバイス誤動作シミュレーションの適用可能性を示すことができた。

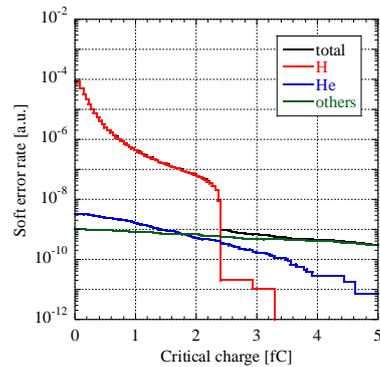


図3 陽子誘起ソフトエラー率の計算結果

## <引用文献>

- [1] H. Kiriya et al., IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 21, 1601118 (2014).
- [2] T. Sato et al., "Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52", J. Nucl. Sci. Technol. 50, 913 (2013).
- [3] S. Abe et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 59, 965-970 (2012).

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- ① M. Nishiuchi, H. Sakaki, T.Zh. Esirkepov, K. Nishio, T. A. Pikuz, A. Ya. Faenova, I. Yu. Skobelev, R. Orlandi, A. S. Pirozhkov, A. Sagisaka, K. Ogura, M. Kanasaki, H. Kiriya, Y. Fukuda, H. Koura, M. Kando, T. Yamauchi, Y. Watanabe, S. V. Bulanov, K. Kondo, K. Imai, and S. Nagamiya, Towards a Novel Laser-Driven Method of Exotic Nuclei Extraction-Acceleration for Fundamental Physics and Technology, Plasma Physics Reports, 査読有 42巻, 4号, 2016, 327-337 DOI: 10.1134/S1063780X1604005X
- ② Anatoly Ya. Faenov, Maria A. Alkhimova, Tatiana A. Pikuz, Igor Yu. Skobelev, Mamiko Nishiuchi, Hironao Sakaki, Alexander S. Pirozhkov, Akito Sagisaka, Nicholas Dover, Kotaro Kondo, Koichi Ogura, Yuji Fukuda, Hiromitsu Kiriya, Alexander Andreev, Keita Nishitani, Takumi Miyahara, Yukinobu Watanabe, Sergey A. Pikuz Jr., Masaki Kando, Ruosuke Kodama, Kiminori Kondo, The effect of laser contrast on generation of highly charged Fe ions by ultra-intense femtosecond laser pulses, Appl. Phys. B, 査読有 123巻, 2017, 197(7頁) DOI 10.1007/s00340-017-6771-2
- ③ Mamiko Nishiuchi, Hiromitsu Kiriya, Hironao Sakaki, Nicholas P. Dover, Kotaro

Kondo, Takumi Miyahara, James Koga, Alexander S. Pirozhkov, Akito Agisaka, Yuji Fukuda, Koichi Ogura, Yukinobu Watanabe, Masaki Kando, Kiminori Kondo, Ion Acceleration Experiment with the High Intensity, High Contrast J-KAREN-P Laser System、レーザー研究、査読有 2018、印刷中

[学会発表] (計9件)

- ① 宮原 巧、渡辺幸信、西内満美子、榊 泰直、ドーバー・ニコラス、近藤康太郎、福田祐仁、輝尽性蛍光体検出器によるレーザー駆動イオンビーム診断系の開発、日本原子力学会九州支部第36回研究発表講演会、2017年12月
- ② 宮原 巧、渡辺幸信、西内満美子、榊 泰直、DOVER Nicholas、近藤康太郎、福田祐仁、輝尽性蛍光体検出器によるレーザー駆動イオンビーム診断系の開発、ビーム物理研究会2017、2017年11月
- ③ 榊 泰直、西内満美子、ドーバー・ニコラス、近藤康太郎、岩田佳之、宮原 巧、渡辺幸信、神門正城、近藤公伯、輝尽性蛍光体検出器のLET依存性を利用したイオン核種弁別法、日本物理学会第73回年次大会、2018年3月
- ④ 西内満美子、榊 泰直、ドーバー・ニコラス・ピーター、近藤康太郎、桐山博光、コーガ・ジェームズ、渡辺幸信、神門正城、近藤公伯、畑 昌育、岩田夏弥、千徳靖彦、超高強度高コントラスト J-KAREN-P によるイオン加速実験の現状とその応用、日本物理学会第73回年次大会、2018年3月
- ⑤ 西内満美子、桐山博光、ピロジコフ・アレキサンダー、榊 泰直、ドーバー・ニコラス、匂坂明人、近藤康太郎、福田祐仁、小倉浩一、西谷勁太、宮原 巧、渡辺幸信、マリア・アルキモバ、ファエノフ・アナトリー・ピクツタチアナ、神門正城、近藤公伯、超高強度高コントラストレーザーJ-KAREN-P システムによるレーザープラズマ相互作用およびイオン加速、日本物理学会第72回年次大会、2017年3月
- ⑥ 榊 泰直、西内満美子、ドーバー・ニコラスピーター、近藤康太郎、福田祐仁、桐山博光、西谷勁太、宮原 巧、ピロジコフ・アレキサンダー、匂坂明人、小倉浩一、アルキモバ・マリヤ、ファエノフ・アナトリー・ピクツタチアナ、渡辺幸信、神門正城、近藤公伯、J-KAREN-P における高精度な荷電粒子計測について、日本物理学会第72回年次大会、2017年3月

⑦ 近藤康太郎、西内満美子、桐山博光、ピロジコフ・アレキサンダー、榊 泰直、ドーバー・ニコラスピーター、匂坂明人、福田祐仁、小倉浩一、西谷勁太、宮原 巧、渡辺幸信、アルキモバ・マリヤ、ファエノフ・アナトリー、ピクツ・タチアナ、神門正城、近藤公伯、超高強度レーザーJ-KAREN-P によるイオン加速実験のリアルタイムレーザービームモニターの構築、日本物理学会第72回年次大会、2017年3月

⑧ 西谷勁太、榊 泰直、西内満美子、ニコラス・ドーバー、金 政浩、渡辺 幸信、福田祐仁、神門正城、近藤公伯、J-KAREN-P によるレーザー駆動イオン加速実験に向けたトムソンパラボ分光器におけるキャリブレーション手法、日本物理学会第71回年次大会、2016年3月

⑨ 西内満美子、榊 泰直、ピロジコフ・アレキサンダー、匂坂明人、今 亮、福田祐仁、桐山博光、ニコラス・ドーバー、小倉浩一、西谷勁太、渡辺 幸信、ファエノアナトリー、ピクツタチアナ、長谷部裕雄、奥野広樹、神門正城、近藤公伯、超高強度コントラストレーザーJ-KAREN-P システムによるレーザープラズマ相互作用およびイオン加速、日本物理学会第71回年次大会、2016年3月

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

無し

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

渡辺 幸信 (WATANABE, Yukinobu)  
九州大学・大学院総合理工学研究院・教授  
研究者番号：30210959

### (2) 連携研究者

榊 泰直 (SAKAKI, Hironao)  
量子科学技術研究開発機構・量子ビーム科学研究部門・上席研究員  
研究者番号：00354746

西内満美子 (NISHIUCHI, Mamiko)  
量子科学技術研究開発機構・量子ビーム科学研究部門・上席研究員  
研究者番号：70391315