

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：82645

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22424

研究課題名（和文）微細スピントロニクス素子における放射線影響評価とそのメカニズムの解明

研究課題名（英文）A study of the radiation effect and its mechanism on nano-fabricated spintronics devices

研究代表者

渡部 杏太（Watanabe, Kyota）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究開発員

研究者番号：00871518

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：不揮発性メモリに用いられるスピントロニクス素子は、概ね耐放射線性を有することが報告されている一方、その放射線影響メカニズムは解明されていない。これは、その作製と放射線照射実験の難しさが原因である。本研究ではその解明へ向け、短いターンアラウンドタイムで準備が可能な磁性ナノドットアレイ素子に着目し、放射線影響評価の容易化と効率化を目指した。実際に作製した素子で重粒子イオン照射実験を実施したところ、大線量照射にもかかわらず照射後にも異常Hall効果を観測することができ、提案する実験手法の実現可能性が確認された。また、世界に先駆けて、重粒子イオン照射によるHall抵抗レベルの不可逆な変化も観測した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で確立した実験手法を用いることで、微細化が進んだスピントロニクス素子における放射線影響メカニズムの解明へ近づくことができる。その解明によって、放射線に対して信頼性を担保するデバイスや、宇宙用不揮発性デバイスの設計指針の議論が可能となることが期待される。また近年では、地上用途の一般的な集積回路においても、微細化・高集積化に伴う放射線耐性低下は問題となっている。本研究成果は宇宙用の電子部品の高性能化のロードマップを描くのに資するのみならず、海・空・宇宙まで通信領域を拡大するとされる次世代ICTの実現のための高信頼性デバイスの実現を根幹で支える基盤技術の醸成への貢献も期待される。

研究成果の概要（英文）：Spintronics devices in nonvolatile memories have been generally reported to be radiation tolerant. However, the mechanism of their interaction has not been elucidated because of the difficulties in the fabrication and the irradiation experiment. In this study, the magnetic nanodot-array devices were chosen in virtue of its shorter turnaround time to make the experiments easy and efficient. The anomalous Hall effect were measurable in the fabricated devices even after the large fluence irradiation of the heavy-ion beam, proving the feasibility of the proposed experiment. Moreover, an irreversible change in the level of Hall resistance was observed through the heavy-ion irradiation for the first time.

研究分野：宇宙用電子部品

キーワード：スピントロニクス 宇宙応用 不揮発性メモリ 放射線影響 強磁性体 ナノテクノロジー 異常Hall効果 重粒子イオン照射

## 1. 研究開始当初の背景

太陽から離れた新宇宙探査等をミッションとする宇宙機のエネルギー制約は大きく、宇宙用の集積回路 (**LSI**) には低消費電力であることが要求され、その解として不揮発性デバイスが注目されている。一方で、**LSI** への放射線入射は誤動作の原因となることが知られており、宇宙環境では高エネルギーの放射線に曝されるため、耐放射線性も求められる。注目を集める次世代不揮発性デバイスの一つに磁気抵抗メモリ (**MRAM/STT-MRAM**) があり、その中核はスピントロニクス素子 (磁気トンネル接合 (**MTJ**)) が担っている。磁気トンネル接合の放射線影響は、最小 **42 nm** 径 (次世代不揮発性デバイスで最小) まで調べられているが [ **D. Kobayashi et al., Jpn. J. Appl. Phys. 56, 0802B4 (2017).** ] そのメカニズムは未解明のままとなっている。当該先行研究では、直径が **50 nm** 以下の時に初めて放射線誘起の磁化反転 (ソフトエラー) を観測し、スピントロニクス素子の放射線影響は微細化によって初めて見えてくるということを示していた。一般に **LSI** の高性能化は、構成素子の微細化/高集積化によって達成されるため、将来の宇宙用 **LSI** の高性能化のためには、微細なスピントロニクス素子の放射線影響を評価、理解する必要がある。そのためには、素子のサイズや材料、構造を系統的に変えた試料において、統計的に十分な数の実験を行う必要がある。しかしながら、放射線照射施設のビームタイムは有限かつ間欠的であり、そのために短いターンアラウンドタイム (**TAT**) で実験試料が作製できる必要がある。これまで実験に用いられてきた **MTJ** は壊れやすいため取り扱いが難しく、実験準備の **TAT** を短くすることは難しかった。また、素子が微細なために放射線を命中させるのが難しく、限られたビームタイムの中で統計的に有意な実験データの取得が困難だった。微細なスピントロニクス素子の放射線影響メカニズムの解明のためには、上記を改善した実験手法が必要である。

## 2. 研究の目的

本研究では、微細なスピントロニクス素子の放射線影響メカニズムの解明へ向け、短い **TAT** で準備が可能であり、取り扱いが容易であり、また放射線照射の統計性を高めることができると考えられる磁性ナノドットアレイ素子に着目し、放射線照射実験の実現可能性を確かめ、その実験手法の確立を目的とする。

## 3. 研究の方法

磁性ナノドットアレイ素子とは、近年その作製・評価手法が確立された実験用スピントロニクス素子である。多数の磁性ナノドットが金属材料のクロスバー (**Hall** バー) 上に形成された構造を有し、異常 **Hall** 効果を通じてナノドットの垂直磁化成分が得られる素子となっている。**MTJ** とは異なり磁化状態を読み出すためのトンネルバリアが不要であり、したがって静電破壊の懸念が小さい。放射線照射実験のためには素子をウェハから切り出してボンディングして組み立てる必要があるため、取り扱いが容易であることによって間欠的なビームタイムに合わせた短い **TAT** での柔軟な実験準備が可能となる。また、一つの素子が **100** 以上の磁性ナノドットを有するため、統計的に十分な数の放射線を命中させるために必要な照射時間も短くて済み、限られたビームタイムでの実験により適している。また、**MTJ** に典型的に用いられる材料系を磁性ナノドットアレイ素子でも用いることにより、**MTJ** の一部を抜き出して多数並べているのと同様な状況とみなすことができる。

**DC/RF** マグネトロンスパッタリングを用いて、高抵抗 **Si** ウェハ上に (ウェハ側から) **W(5 nm)/CoFeB(1.7 nm)/MgO(1 nm)/Ta(1 nm)** からなる薄膜を製膜した。電子線ビームリソグラフィと **Ar** イオンミリングを用いて **CoFeB** 層まで加工し、**100 nm** 間隔で並ぶ **80 nm** 直径 (設計値) のナノドットアレイを形成した。次に、フォトリソグラフィと **Ar** イオンミリングを用いて **W** 層を加工し、**2 μm** 幅の **Hall** バーを作製した。最後に、フォトリソグラフィとスパッタリング、リフトオフを用いて **Cr(5 nm)/Au(100 nm)** からなる電極を形成した。加工後に、**300** の熱処理を真空中で **1** 時間施した。走査型電子顕微鏡 (**SEM**) を用いて観察し、設計通りに **80 nm** のナノドットのアレイが作製されていることを確認した。垂直磁界を掃引して **Hall** 抵抗を測定するとヒステリシスが得られ、垂直磁界が得られていることが確認できた。また、静電破壊等に起因した不良素子はほとんどなく、歩留まりはほぼ **100%** であった。ウェハからそれぞれの素子を切り出し、実験用に組み立てた。

## 4. 研究成果

量子科学技術研究開発機構 (**QST**) 高崎量子応用研究所にて稼働しているイオン照射研究施設 (**TIARA**) の宇宙用ビームライン (**HD2** ポート) を用いて、真空中の放射線照射実験を実施した。**HD2** ポ



図 1: ビームラインの概観

ートの概観写真を図 1 に示す。照射に用いる放射線には、**Xe(454 MeV)**重イオン線を選択した。このとき、放射線の電離作用を表す指標である **Linear Energy Transfer (LET)** は約 **69 MeV cm<sup>2</sup> mg<sup>-1</sup>** であり、高い LET を持つ放射線を選択している。これは、過去の MTJ の放射線照射実験では、高 LET の場合にのみ影響がみられていたためである。静止軌道上の放射線フラックス (CRÈME 2009 データベースより) のプロットを図 2 に示す。実際の静止軌道に存在する放射線は、電子、陽子、ヘリウムから重イオンまで多岐にわたっているが、LET に対して整理することにより、このようなスペクトルが得られる。このとき、実験に用いた Xe イオンビームの LET も併せて図示した。本実験は、実際に Xe イオンが入射する場合を模擬しているのではなく、これと同じ LET を持つ放射線が入射した場合一般の影響を調べていることを強調する。選択した Xe イオンビームと同じ LET と同等の LET を持つ放射線が入射する頻度は図 2 より、**1 cm<sup>2</sup> あたり 1 年に 10<sup>3</sup> 回**、すなわち **1000 年に 1 回** であることがわかる。このような、軌道上では極めてまれな高エネルギー (LET) を持つ重粒子を、本実験では **1 cm<sup>2</sup> あたり最大 10<sup>9</sup> 個の大線量**を照射しており、これは静止軌道 **10<sup>12</sup> 年分** (ただし Tbit であれば **1 年分**) に相当する加速実験として実施するものである。

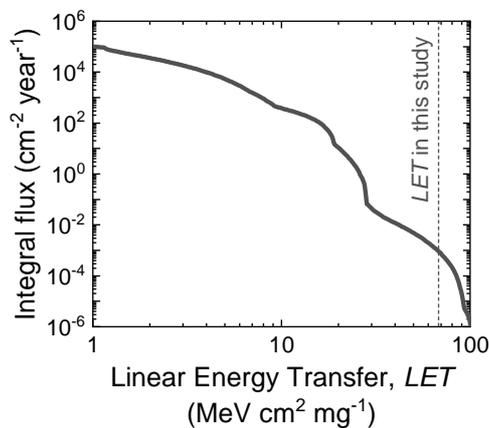


図 2: 静止軌道における放射線フラックス

照射実験中のドットアレイの操作 (磁化反転) には、永久磁石を用いた。実験データの模式図を図 3A に示す。永久磁石を用いて Hall 抵抗変化のダイナミックレンジを確認するとともに、ある方向 (本実験では Hall 抵抗が低い側) へ初期化を行う。その後、照射チャンバの真空引きを行い、放射線を照射する。その後、走者チャンバを大気圧に戻し、再び永久磁石を用いて、ドットアレイの磁化状態を (破壊的に) 読み出すとともに、照射後のダイナミックレンジの確認を行う。そして、このフロー全体を通して、Hall 抵抗をモニタする。実際の測定データを図 3B に示す。第一に、大線量の重イオン照射後でも異常 Hall 抵抗変化を介して磁性体の状態の読み出しが可能であることがわかる。これにより、異常 Hall 効果を用いた磁性ナノドットアレイ素子における磁性体の放射線影響評価の実現性確認と実験系の構築が達成されたと言える。また、照射前後の Hall 抵抗を比較すると、磁化の反転やダイナミックレンジの減少等の顕著な影響は起きていないことがわかる。他方、原因は不明だが、放射線照射によって Hall 抵抗レベルに不可逆なシフトが観測された。このような影響の報告は前例が無い。本研究で確立した実験手法を用いて磁性ナノドットのサイズ依存性や材料・構造依存性を評価することにより、微細スピントロニクス素子における放射線影響メカニズムの解明への貢献が期待される。

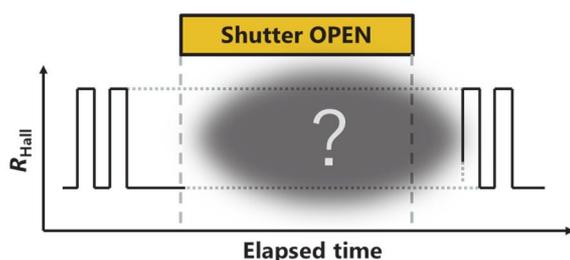


図 3A: 照射実験データの模式図

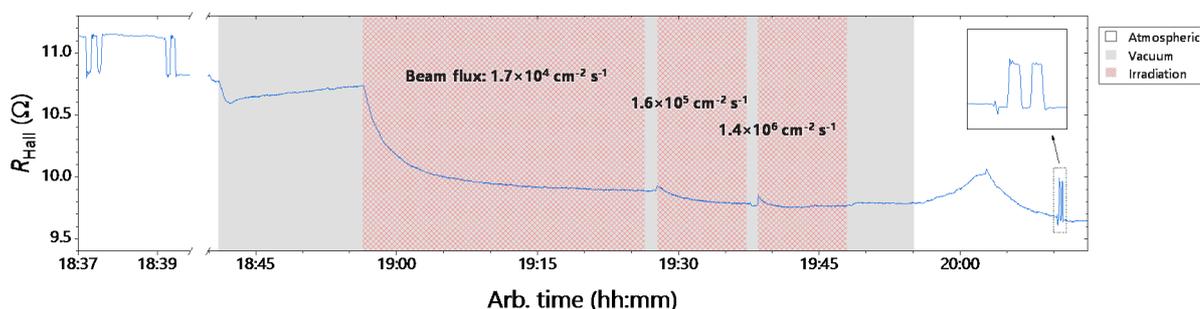


図 3B: 放射線照射前、照射中、照射後の Hall 抵抗

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 K. Watanabe, K. Takeuchi, H. Shindo, J. Igarashi, Y. Takeuchi, B. Jinnai, and S. Fukami
2. 発表標題 Radiation effect study on CoFeB/MgO nanodot-array
3. 学会等名 FY2021 RIEC Annual Meeting on Cooperative Research Projects
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Watanabe, T. Tanigawa, S. Ikeda, S. Shinada, H. Koike, T. Makino, T. Ohshima, T. Shimada, K. Hirose, H. Shindo, D. Kobayashi, and T. Endoh
2. 発表標題 Design and Heavy-Ion Testing of MTJ/CMOS Hybrid LSIs for Space-Grade Soft-Error Reliability
3. 学会等名 2022 IEEE International Reliability Physics Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------