

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K12003

研究課題名（和文）高エラーな不揮発メモリを用いた低消費電力ニューラルネットワークデバイスの提案

研究課題名（英文）Theoretical Study on Low-Power Neural Network Devices with High-Error Nonvolatile Memory

研究代表者

荒井 礼子（ARAI, Hiroko）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

研究者番号：50431755

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）：エラー率の高いメモリを積極的に利用することを目標に、電圧駆動型の磁気メモリ（VC-MRAM）を対象に、書き込みエラーと保持エラーに注目した研究を行った。まず製造時の物性ばらつきを想定した場合の書き込みエラー率分布について理論研究を行い、書き込みエラー率の確率密度関数を導出した。また保持エラーと書き込みエラーの関係について解析的・数値的に調べ、特徴的な時間について議論した。

研究成果の学術的意義や社会的意義  
エラー率の高いメモリを利用したメモリシステムの実現に向けて、メモリシステム的设计、運用に必要な基礎的な情報を提供できる理論的枠組みを構築した。

研究成果の概要（英文）：In order to utilize memory devices with high error rate, we conducted a theoretical research on voltage-controlled magnetic random access memory (VC-MRAM), focusing on write and retention errors. The probability density function of the write error rate was derived under the assumption of a material parameter variations. Also, characteristic time between retention error and write error was discussed.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：MRAM 磁性メモリ 書き込みエラー率 WER

## 1. 研究開始当初の背景

ニューラルネットワーク技術や自動運転技術などの急激な進展や IoT 社会への期待感から、学習機能を持った超低消費電力な情報処理デバイスが望まれている。しかし、従来の半導体微細化技術の発展が鈍化していることから、微細化に頼らない方向性の技術開発が活発になりつつある。

例えば脳の神経細胞とシナプスの働きを模倣した、非線形な発振素子やアナログ動作する多値抵抗素子を用いた計算システムの提案が挙げられる。あるいは、要求される精度・品質を十分保ちつつもエラー訂正なしで動作させることで計算精度を担保するための冗長な回路や処理を省略し消費エネルギーを削減する方向性の検討もなされている。

申請者は重みなしニューラルネットワークに着目した予備検討で、一様な書き込みエラー率を仮定し、あるエラー率までは分類性能が落ちないことを確認した。しかしながら、メモリ素子の製造時ばらつきに起因する書き込みエラー率は一様ではなく、何らかの分布をもつはずである。また、書き込みエラーの他に情報保持エラーも考えられる。情報保持エラーは、メモリの熱耐性に起因し、情報の喪失が起こる。書き込みエラーと情報保持エラーは質的に異なるエラーであり、ニューラルネットワークアプリケーションの最終結果にどのような影響を与えるか、最終結果の精度を落とさずに低消費電力化が可能なのか、一般的な指針が得られるか、については十分に明らかとなっていない。

## 2. 研究の目的

本研究では、メモリ素子の製造時ばらつきに起因する書き込みエラーや情報保持エラーがニューラルネットワークアプリケーションにどのような影響を与えるかを評価することにより、信頼性の低いメモリデバイスの有用性を明らかにする。

## 3. 研究の方法

メモリの動作エラーとして、以下の二つを想定する。(1)書き込みエラー:メモリ素子に正しく書き込めないことにより意図しない情報となること。(2)情報保持エラー:書き込み時以外にメモリ素子の状態が変化し意図しない情報となること。メモリは電圧駆動 MRAM (VC-MRAM) を想定する。本研究では、VC-MRAM の動作原理上、最も重要と考えられる磁気異方性定数に着目する。磁気異方性定数がばらつきを持つ時に、MRAM における書き込みエラー率のばらつきを数値的および解析的に求める。

## 4. 研究成果

まず、VC-MRAM において磁化ダイナミクスシミュレーションを行い、書き込みエラー率と磁気異方性定数の関係を明らかにした。その結果、電圧パルス幅を固定した場合、書き込みエラー率は磁気異方性定数の単純な関数で表せることがわかった。次に、メモリ素子の磁気異方性定数が正規分布に従ってばらついていると仮定し、書き込みエラー率の確率密度関数を解析的に導出した。また、確率密度関数の形状を分類する条件を明らかにした。さらに数値シミュレーションを併用することにより、書き込みエラー率の分布（ヒストグラム形状）が磁気異方性定数のばらつき度合いに強く依存することを明らかにした。

さらに、書き込みエラー率の分布形状について期待値や分散だけでなく分布の歪みや裾の広がり具合の指標（歪度・尖度）も含めて調べ、メモリ素子の動作条件と物性値ばらつきの組み合わせで様々な形状の分布となり得ることがわかった。

情報保持エラーについては先行研究により解析式が与えられている。書き込みエラー率と合わせて解析することにより、書き込みエラー率と同程度のエラー率で情報を保持できる特徴的な時間について議論した。これらの結果について、学会発表、論文出版を行った。

また、書き込みエラー率の分布形状がメモリ動作にどのような影響を与えるのかを調べるため

の数値シミュレーションを実施した。書き込みのパターンにより、エラー率分布の効果が現れる場合と現れない場合があることが示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Arai Hiroko, Hirofuchi Takahiro, Imamura Hiroshi	4. 巻 16
2. 論文標題 Probability Distribution of the Write-Error Rate of Voltage-Controlled Magnetoresistive Random-Access Memories	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 64068
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevApplied.16.064068	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroko Arai, Hiroshi Imamura	4. 巻 572
2. 論文標題 Characteristic time of transition from write error to retention error in voltage-controlled magnetoresistive random-access memory	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 JOURNAL OF MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS	6. 最初と最後の頁 170624
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jmmm.2023.170624	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroshi Imamura, Hiroko Arai, Rie Matsumoto	4. 巻 563
2. 論文標題 Distribution of write error rate of spin-transfer-torque magnetoreistive random access memory caused by a distribution of junction parameters	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JOURNAL OF MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS	6. 最初と最後の頁 170012
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jmmm.2022.170012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 荒井 礼子, 広淵 崇宏, 今村 裕志
2. 発表標題 電圧駆動MRAM における書き込みエラー率の確率分布に関する理論的研究
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荒井 礼子, 斉藤 大貴, 佐藤 幸紀, 広淵 崇宏, 今村 裕志
2. 発表標題 書き込みエラー率分布を考慮した不揮発メインメモリシステムによるビット化け発生数の評価
3. 学会等名 応用物理学会
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