

令和 6 年 9 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H04561

研究課題名(和文) シリコンスピントランジスタの高性能化とスピン演算機能の発展

研究課題名(英文) Creation of high-performance Si-based spin transistors and development of their spin calculation functions

研究代表者

白石 誠司 (Shiraishi, Masashi)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：30397682

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 28,100,000円

研究成果の概要(和文)：(1)Siスピントランジスタにおける磁気抵抗比100%の実現とそれに伴う再構成可能論理回路の創出

(2)スピン演算機能の発展によるMagnetic Logic Gate(MLG)の実現  
の2点について3年間研究を行い、(1)では磁気抵抗比100%の実現には至らなかったものの、研究開始当初にその実現への大きな障壁となっていた寄生抵抗と強磁性体/Si界面のショットキー障壁問題をいずれも回避する施策を見出し実現した。(2)では目標通りのスピン演算("NAND"、"OR"など)をシリコンスピントランジスタを用いて実現できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

低消費エネルギー情報演算のキーテクノロジーの1つであるスピン演算の視点から、毒性がなくユビキタス材料であるシリコンを用いたスピン演算を実現し、将来的な応用に向けた基盤技術を構築していた点に大きな学術的・社会的意義を有する。

研究成果の概要(英文)：I have driven the research project by setting the following targets: (1) Realization of MR ratio of 100% using SI spin FET and creation of spin-based logic circuit using it, and (2) Realization of Magnetic Logic Gate(MLG) using Si spin FET. As for (1) I established approaches to circumvent the obstacles for realizing the MR ratio of 100%, (a) parasitic resistance problem and (b) the Schottky barrier problem, although the MR ratio of 100% was not unfortunately achieved. As for (2), I realized spin-based logic system and demonstrated calculations such as "NAND" and "OR" by using Si spin FETs.

研究分野：物性物理

キーワード：スピントランジスタ シリコン スピン演算

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

スピントロニクスは、情報の揮発性や微細化に伴う膨大な発熱といった、既存の半導体エレクトロニクスが直面している諸問題の解決を目指す、いわゆる beyond-CMOS の観点から現在盛んに研究されている研究領域であり、その省エネ性や多機能性から IoT や AI など幅広い応用が期待されている。中でもシリコン(Si)スピントロニクスは、上記の利点に加えて Si そのもののユビキタス性と無毒性、注入されたスピントロニクス (スピン情報寿命) の良好性、さらに応用に際した既存の半導体インフラをほぼそのまま活用できる産業親和性の良さなどから長年世界中で激しい研究競争が繰り広げられてきた、電気電子工学・物性工学における最重要研究課題の 1 つである。基礎科学/応用研究両面で極めて重要な一里塚と認められていたのが Si スピントランジスタの創出と演算の実現であり、菅原=田中型と呼ばれるスピントランジスタ (電荷ベースのトランジスタの電極を強磁性体に変更しスピン機能を導入した素子であり、ゲート電圧による on/off に加え、2 つの電極の磁化配置 (平行/反平行) で transconductance を制御する素子) の創出とそれによる再構成可能論理回路などの省エネルギー論理演算システムの実現や、スピン流 (電荷の流れを伴わないスピン角運動量のみの流れ) を用いた Magnetic Logic Gate (MLG) と呼ばれる省エネルギー演算 [2] の実現などの、スピン機能を用いた電荷ベースでは実現できない省エネルギーかつ新奇な、様々な演算機能の実現が強く希求されてきた。

2. 研究の目的

本提案では、

(1) Si スピントランジスタにおける磁気抵抗比 100% の実現とそれに伴う再構成可能論理回路の創出

(2) スピン演算機能の発展による Magnetic Logic Gate (MLG) の実現

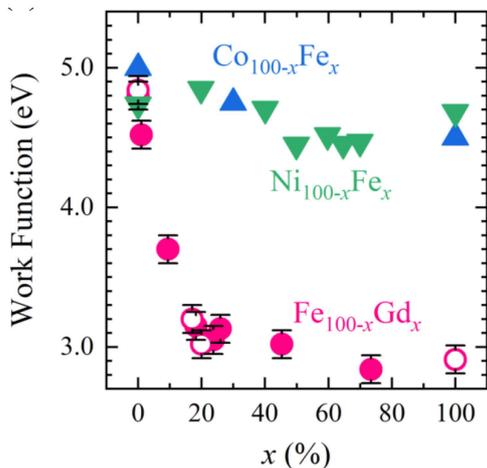
を 3 年間の研究期間で達成し、Si スピントロニクスを本格的応用展開に資するものとした。

(1) では、提案者が長年共同研究を進めている相手先企業による検討で、100% の磁気抵抗比が得られれば例えば上述の再構成可能論理回路への応用が見えてくる、とのことであるが現時点のそれは 1.4% に留まっている。他の性能指数、例えばスピン電流 on/off 比は既に応用上必要な 104 以上取れており、また室温でも素子動作が達成されているため、磁気抵抗比を 100% に早急に近づけることが焦眉の急であり、目的の第一とした。(2) では、応用展開には前述のようにスピンを用いた省エネルギー演算の実現は必須であることは論を俟たないが現在のスピン演算機能は未だ限定的である。そこで磁化とスピンの相対角度によるスピン演算機能を発展させ、論理ゲートを組み換え可能で集積化に有利な論理回路である MLG の動作実現を期間中に達成することを目的の第二とした。

3. 研究の方法

目標達成に向けたアプローチとしては、(1) に関しては強磁性体のスピン偏極率を向上させると同時に磁気抵抗比を下げる要因の 1 つである界面抵抗を抑制することを同時に達成できる強磁性体の探索、デバイス作製プロセス上不可避のアニールプロセスによるスピン信号低下の抑制、従来の横型スピントランジスタ構造では不可避のチャネル抵抗の存在を本質的に回避する縦型シリコンスピントランジスタの創出、を並行して行った。(2) に関しては横型シリコンスピントランジスタを用いて多端子素子を新たに作製しスピン演算のデモンストレーションを目指した。

4. 研究成果



(1) Si スピントランジスタにおける磁気抵抗比 100% の実現とそれに伴う再構成可能論理回路の創出

まずスピン偏極率を向上させると同時に磁気抵抗比を下げる要因の 1 つである界面抵抗を抑制することを可能とする強磁性体の探索に関しては、フェリ磁性金属では Gd が、その仕事関数が小さいことから有力な材料となる。一方 Gd はキュリー温度が室温に届かないため単体では目的に合致しない。そこで室温強磁性を持つ Fe に Gd を微量添加していき、室温における強磁性の維持と仕事関数の抑制という一見物理的に両立しにくい目的を同時に達成することを目指した。左図に結果を示すが、他の CoFe、NiFe 系とは異なり、FeGd の



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 1件）

1. 著者名 Yamashita N., Lee S., Ohshima R., Shigematsu E., Koike H., Suzuki Y., Miwa S., Goto M., Ando Y., Shiraishi M.	4. 巻 11
2. 論文標題 Investigation of the thermal tolerance of silicon-based lateral spin valves	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 10583
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-90114-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 —

1. 著者名 N. Yamashita, E. Shigematsu, S. Honda, R. Ohshima, M. Shiraishi, Y. Ando	4. 巻 6
2. 論文標題 Realization of efficient tuning of the Fermi level in iron-based ferrimagnetic alloys	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 104405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 H. Inoue, H. Koike, R. Ohshima, Y. Ando, M. Shiraishi	4. 巻 108
2. 論文標題 Precise estimation of spin drift velocity and spin mobility in the absence of synthetic Rashba spin-orbit field in a Si metal-oxide-semiconductor	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 214414
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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4件（うち招待講演 1件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 H. Inoue, M. Shiraishi, Y. Ando, R. Ohshima, E. Shigematsu, H. Koike
2. 発表標題 Estimation of spin drift velocity considering effective magnetic field due to Rashba SOI in silicon spin MOSFET
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 白石誠司, 井上元, 大島諒, 安藤裕一郎, 小池勇人
2. 発表標題 人工Rashba効果を考慮したシリコン中のスピンドリフト速度の定量的評価
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Shiraishi
2. 発表標題 Silicon spintronics for electronic devices
3. 学会等名 AM-FPD21 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上元, 重松英, 大島諒, 安藤裕一郎, 白石誠司, 小池勇人
2. 発表標題 Estimation of spin drift velocity considering effective magnetic field due to Rashba SOI in silicon spin MOSFET
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

[図書] 計0件

[産業財産権]

[その他]

Phys. Rev. Materials誌掲載論文 (N. Yamashita et al.) についてはPhysics誌にFeatured Articleとして紹介された (DOI: 10.1103/Physics.15.s136)。
--

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
---------	---------