

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21972

研究課題名(和文)反強磁性体を用いた革新的超高速スピndeバイスの実証

研究課題名(英文)Exploration of ultra-high speed spintronic devices using antiferromagnets

研究代表者

森山 貴広(Takahiro, Moriyama)

京都大学・化学研究所・准教授

研究者番号：50643326

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：本課題は、超短時間領域の反強磁性磁化ダイナミクスを理解し、磁化反転デバイスを実証することを目的としている。まず、NiOや γ -Fe₂O₃等の反強磁性材料についてその磁化ダイナミクスの調査を行い、磁化ダイナミクスを理解する上で重要な共鳴周波数やダンピング定数が結晶性やカチオン置換元素によって自在に変化することを明らかにした。さらに、光伝導スイッチを用いたピコ秒電流パルス反強磁性体に注入し、磁化反転を誘起する実験を行ったが、磁化反転を明瞭に捉えることができていない。本実験を通して、光伝導スイッチの最適化や電流パルス導入手法について、具体的な問題点を洗い出した。今後、目的達成に向けて研究を継続する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、将来の超高速通信や超高速情報処理に供する革新的超高速スピndeバイスの実証を目指す挑戦的なものである。今回得られた反強磁性体の共鳴周波数や磁気ダンピング等の磁化ダイナミクス制御に関する知見は、超高速スピndeバイスを設計する上で重要な指針となる。超高速磁化反転を明瞭に捉えることはできなかったが、超高速スピndeバイスを実現する上で複数の具体的な問題点について洗い出すことができた。今後研究を継続することによって、反強磁性スピndeバイスの超高速動作が実証できれば、従来のスピントロニクス素子では成し得なかった時間領域(<ピコ秒)の超高速性能を持つ革新的スピndeバイスへと展開できる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to understand the antiferromagnetic magnetization dynamics in the ultra-short time domain and to demonstrate the magnetization reversal device. First, we investigated the magnetization dynamics of antiferromagnetic materials such as NiO and γ -Fe₂O₃, and found that the resonance frequency and damping constant, which are important for understanding the magnetization dynamics, can be controlled depending on the crystallinity and cation substitution elements. Second, we devised a photoconductive switch which generates and injects a picosecond current pulse into the antiferromagnetic element to reverse the magnetization. The magnetization reversal has not been clearly captured yet. Meanwhile, some issues have been identified regarding the optimization of the photoconductive switch and the current pulse introduction method. The research will be continued to achieve the goals.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピントロニクス 反強磁性体 反強磁性共鳴

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は近年、これまでほとんど研究がされていなかった反強磁性体に着目し、反強磁性材料を積極的に用いて新規スピントロニクス素子への応用を目指す「反強磁性スピントロニクス」に関する研究を先駆的・精力的に進めてきた。これまでに、反強磁性体においてスピントルク効果が有効であることを見出し[1-3]、磁気抵抗効果による反強磁性磁化方向の電気的検出に成功[4]、さらにスピントルク効果と磁気抵抗効果をうまく組み合わせることによって反強磁性磁気メモリの動作原理を実証している[5,6]。これらの一連の研究から、これまで困難であると考えられてきた反強磁性体の磁化操作や検出手法を確立した。しかしながら、反強磁性体の最も魅力的な特性の一つである高速応答性を利用した、サブピコ秒での超高速磁化操作は実証されていない。実証が困難である背景に、サブピコ秒の超短パルス電流の生成・導入手法が、従来の強磁性体でよく用いられている高周波測定技術の単純延長では実現不可能であり、測定上の難易度が高いことが挙げられる。

この様な現状において、研究代表者は光伝導スイッチ技術がサブピコ秒の超短パルス電流を効率よく発生させるのに最適であることに着目した。特にキャリア寿命の短い低温成長 GaAs 基板上に作製した光伝導スイッチは、その高速応答性を利用して THz 波発生装置などにすでに利用・実用化されており、本提案の超高速磁化操作の実証に適した超短パルス電流発生素子として十分利用できるとの着想に至った。

2. 研究の目的

スピントロニクスは、電子のスピン自由度を利用することで、従来のエレクトロニクスに無い新機能・高性能素子の実現を目指す分野である。その基本動作原理は、局在スピンと伝導電子スピンの相互作用を利用した磁性の制御にあり、さらに磁性を介した電気伝導変化の検出にある。従来のスピントロニクスは強磁性体を主材料とし、その磁化・磁区構造を制御することによって、磁気センサーやメモリ素子など数多の応用を生み出してきている。反強磁性体は、隣り合う局在スピンが反対方向を向いて整列し、全体として磁化がゼロとなっている物質である。その性質から磁化を制御・検出することが一般的に困難であると考えられてきた。しかしながら、研究代表者が主導するものを含む最近の研究結果からスピントルクによる反強磁性体の磁化操作や、反強磁性体における磁気抵抗効果などが実証されてきており、反強磁性体が次世代スピントロニクスにおける新材料として認識されつつある[7]。

反強磁性体の最も魅力的な特性の一つに、THz 帯域に達する高い共鳴周波数がある。これは、反強磁性共鳴周波数が分子磁場に比例するため、通常の強磁性体における強磁性共鳴 (GHz 帯域) に比べて圧倒的に高い。一般に、磁化の動的応答時間の下限値は共鳴周波数の逆数で決まる。すなわち、反強磁性体磁化はピコ秒～サブピコ秒で応答可能である。この反強磁性体の超高速な磁化応答時間を利用した、超高速の磁気メモリ素子や、スピントロニクス素子などの超高速スピントロニクス素子の実現は十分可能であると考えられる。本課題では、反強磁性体のサブピコ秒の磁化反転およびその検出を行い、従来の強磁性体スピントロニクス素子では成し得なかった超短時間領域の磁化反転ダイナミクス

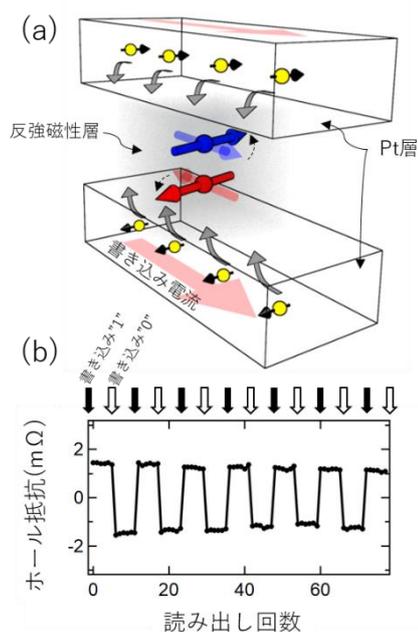


図 1 (a) 反強磁性磁気メモリにおけるスピントルク効果による反強磁性磁化の回転原理 (b)書き込み後、ホール抵抗による磁化状態の読み出し[2-4]

スを理解し、さらにサブピコ秒超高速磁気メモリの動作実証を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

図1は先行研究において研究代表者らが実証した反強磁性磁気メモリの動作原理を示している[2-4]。反強磁性層(NiOやCoGd合金膜など)がPt層で上下から挟まれた構造となっており、層面内に書き込み電流を流すと、Ptのスピントルク効果により反強磁性層にスピントルクが注入される[5]。上下から流入するスピントルクのスピントルクは、それぞれ反対方向を向いているため、反強磁性体の反対方向に整列した局在スピントルクに効率的に作用する。スピントルクは局在スピントルクに回転力(スピントルク効果[5])を与え、反強磁性体の磁化全体が回転するというメカニズムである。研究代表者らは、世界で初めてのスピントルク効果を利用した反強磁性磁気メモリの動作原理を実証(電流による情報書き込み、および読み出し)(図1b)[5,6]しているが、反強磁性体の特性を生かした超高速磁化反転の実証には至っていない。上述のように、原理上、電流印加時間をサブピコ秒まで短くしても反強磁性体磁化はそれに応答し、磁化反転が起こるはずである。すなわち、サブピコ秒の書き込み速度を擁する磁気メモリが実現可能になる。

本課題を成功させるカギは、どのようにサブピコ秒のパルス電流を発生させるか、さらにそのパルス電流をどのように反強磁性スピントルク素子に導入するかにあると考えている。この実現には、これまでスピントロニクスで利用されてきた高周波等の電気測定技術の単純な延長ではない新しい発想・工夫が必要である。図2は、本提案において予定している実験手法の概念図である。キャリア寿命の短い低温成長GaAs基板上に光伝導スイッチを配した金属電極を作製する。光伝導スイッチに超短パルスレーザー(サブピコ~ピコ秒パルス)を照射すると、レーザーのパルス幅に応じたパルス電流が金属電極に発生する。このパルス電流を反強磁性磁気メモリ素子(図1a)に効率よく導入できるようにデバイス構造を配置する。サブピコ秒のパルス電流により図1aに示した原理で反強磁性磁化が回転し、その後、磁気抵抗効果を利用して電気抵抗あるいはホール抵抗の変化により読み出すという仕組みである。

4. 研究成果

研究開始初期において、まず、サブピコ秒の電流パルスを生成しデバイスに注入する手法について検討および実験的検証を行った。GaAs基板上に光伝導スイッチを作製し、約 5×10^7 A/cm²程度の電流パルスがレーザー照射時に発生することを確認した(図3)。また、その光伝導スイッチ近傍に反強磁性体を配置した素子を開設計し、反強磁性体に電流パルスが効率よく注入されるように構成した。このような素子を用いて様々な反強磁性体(NiO, Fe₂O₃, Mn₃Irなど)に電流パルスを注入し、スピントルクによる磁化方向の変化に応じたホール抵抗等の抵抗変化を測定した。

しかしながら今のところ、反強磁性体の磁化反転に起因した電流パルス印加前後の有意な抵抗変化は観測できていない。原

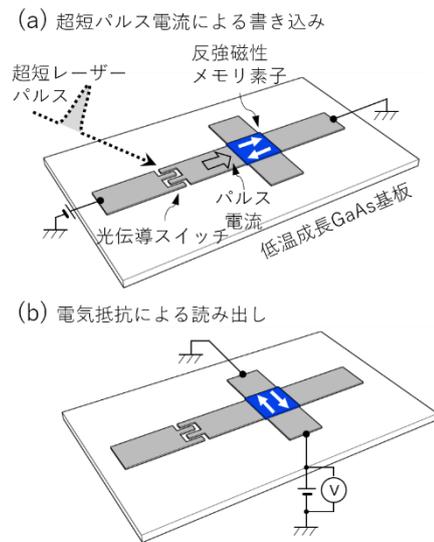


図2 (a)超短パルス電流による書き込みの概念図、および (b)磁気抵抗による読み出し方法の概念図

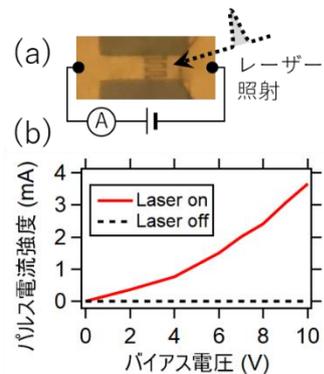


図3 (a) 試作した光伝導スイッチ(チャンネル幅5 μm) (b) パルス電流強度のバイアス電圧依存性

因として、電流密度が磁化反転に十分でないこと、電流パルス幅が最適化されていないこと、抵抗測定時の信号ノイズ比が小さいことなどが挙げられる。電流密度をさらに増加させる方法として、光伝導スイッチに印加するバイアス電圧を増加させる方法が考えられるが、スイッチの電圧破壊が生じるため 10^8 A/cm^2 以上の電流密度を得ることができていない。電流パルス幅については、光伝導スイッチや素子周辺のインピーダンス整合に起因して、レーザーパルスの形状に対して電流パルスが鈍ってしまうという問題が見られた。

以上の様に、反強磁性体の電流誘起磁化反転を観測するのに必要な、光伝導スイッチやレーザー照射系、これらを配置した反強磁性素子を作製し実験を行ったが、ピコ秒磁化反転の実現に関して上記の様な問題があることを見出した。

本研究では、反強磁性体の磁化反転過程についても調べた。反強磁性体の磁化ダイナミクスを理解するためテラヘルツ分光を利用した反強磁性共鳴の実験を行った。本実験により、ダンピング定数が反強磁性体 NiO の結晶性によって大きく異なることを明らかにした(図4)。結晶性によるダンピング定数の増減は、強磁性体においてよく知られているが、反強磁性体においては初めて実験的に示した。これらは反強磁性体の磁化反転ダイナミクスを予想・理解する上で重要な知見である[8, 9]。

さらに、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の反強磁性共鳴についても調査し、モーリン温度と反強磁性共鳴周波数の関係を実験的に明らかにした[10]。本物質は、モーリン温度近傍で磁気異方性が極小になるため、磁化反転に必要な電流パルス強度も小さいと考えられる。モーリン温度近傍で上記の磁化反転実験を行うには、現状の室温実験セットアップに温度変調機能を追加する必要があるため、今後検討する。

参考文献

- [1] [Moriyama et al., Appl. Phys. Lett. 106, 162406 \(2015\).](#)
- [2] [Takei, Moriyama et al., Phys. Rev. B 92, 020409R \(2015\).](#)
- [3] [Moriyama et al., Phys. Rev. Lett. 119, 267204 \(2017\).](#)
- [4] [Moriyama et al., Appl. Phys. Lett. 106, 162406 \(2015\).](#)
- [5] [Moriyama et al., Phys. Rev. Lett. 121, 167202 \(2018\).](#)
- [6] [Moriyama et al., Sci. Rep. 8, 14167 \(2018\).](#)
- [7] [Baltz, Moriyama et al., Rev. Mod. Phys. 90, 015005 \(2018\).](#)
- [8] [Moriyama et al., Phys. Rev. Mater. 5, 051402 \(2019\).](#)
- [9] [Moriyama et al., Phys. Rev. Mater. 7, 074402 \(2020\).](#)
- [10] 林 兼輔、森山 貴広ら、“ $\alpha\text{-Fe}_{2-x}\text{M}_x\text{O}_3$ (M = Al, Ru, Rh, In)における反強磁性共鳴とモーリン温度の組成依存性” 2021 年第 68 回応用物理学会春季学術講演会 18a-P03-5

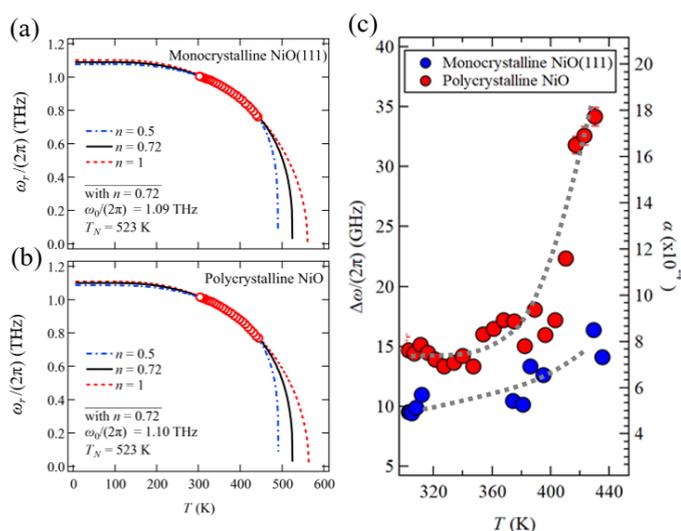


図4 (a,b)単結晶および多結晶 NiO の反強磁性共鳴周波数 (ω_r)の温度依存性(c)共鳴線幅($\Delta\omega$)および磁気ダンピング(α)の温度依存性

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 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Moriyama Takahiro, Hayashi Kensuke, Yamada Keisuke, Shima Mutsuhiro, Ohya Yutaka, Tserkovnyak Yaroslav, Ono Teruo	4. 巻 101
2. 論文標題 Enhanced antiferromagnetic resonance linewidth in NiO/Pt and NiO/Pd	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 60402
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.101.060402	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 該当する

1. 著者名 Moriyama Takahiro, Hayashi Kensuke, Yamada Keisuke, Shima Mutsuhiro, Ohya Yutaka, Ono Teruo	4. 巻 3
2. 論文標題 Intrinsic and extrinsic antiferromagnetic damping in NiO	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 51402
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevMaterials.3.051402	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 Moriyama Takahiro, Hayashi Kensuke, Yamada Keisuke, Shima Mutsuhiro, Ohya Yutaka, Ono Teruo	4. 巻 4
2. 論文標題 Tailoring THz antiferromagnetic resonance of NiO by cation substitution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 74402
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevMaterials.4.074402	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6件（うち招待講演 5件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Takahiro Moriyama
2. 発表標題 Spintronic operations with antiferromagnets
3. 学会等名 Material Research Meeting 2019（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro Moriyama
2. 発表標題 Spintronic operations with antiferromagnets
3. 学会等名 Magnonics 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森山貴広
2. 発表標題 反強磁性体スピントロニクス
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林 兼輔
2. 発表標題 -Fe ₂ -xMxO ₃ (M = Al, Ru, Rh, In)における反強磁性共鳴とモーリン温度の組成依存性
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森山貴広
2. 発表標題 反強磁性体テラヘルツスピントロニクスに向けて
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takahiro Moriyama
2. 発表標題 Controlling antiferromagnetic resonance
3. 学会等名 Intermag 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021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		
米国	University of California, Los Angeles		