

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：12701
研究種目：挑戦的研究（開拓）
研究期間：2018～2021
課題番号：18H05346・20K20362
研究課題名（和文）マグノントランジスタの開拓

研究課題名（英文）Study of magnon transistor

研究代表者

関口 康爾（SEKIGUCHI, koji）

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：00525579

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,800,000円

研究成果の概要（和文）：電子機器はエネルギー消費が急激に増大したため、省エネ性能と高性能化の両立という現代社会の要請にこたえることが徐々にできなくなってきている。一方、磁性体には磁石に代表されるようにエネルギーゼロで情報を保持できる特性があり、その性質と同様に低エネルギーで動作が可能な非電荷キャリア（＝マグノン）が存在する。本研究では世界に先駆けて、マグノンを使って電流ゼロ信号演算を可能にする新しいトランジスタ技術を開拓した。具体的にはマグノンのスイッチ動作を実現し、マグノン波形を維持した長距離ソリトン伝送、バイアス磁場を必要としないで省エネルギーでマグノンを制御することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電気機器の省エネルギー性能の開発は、地球温暖化などグローバルなエネルギー問題と直結する重要なテーマである。マグノンを用いて電流ゼロ信号演算を可能にする新しいトランジスタ技術を開拓した本研究は、この急激に加速する情報化社会的に省エネ性能と高性能化の両立を図る新しいデバイス原理を提供する社会的意義を持っている。マグノンは従来の古典的キャリアではなく量子キャリアであり、将来の量子情報処理技術に発展する可能性をも秘めている。本研究結果で示した、能動的キャリアとしてのマグノン活用技術は量子デバイスでの基礎原理という学術的な意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：Energy consumption of electronic device is increasing in this decade. The electronics faces the difficulty to sustain the development of high-performance signal processing with low energy consumption. In magnets, however, there is a possible information carrier which delivers a spin information with low energy consumption. The magnon, the quantum of spin-wave, is not the charged carrier and being free from the electronic Joule heating. The magnon has the possibility to realize ultra-low power consumption devices.

In this project, we explored the essential techniques to construct the magnon-transistor. Spin-wave (magnon) switch was realized by a double-magnonic crystal. Using the nonlinear effect on spin wave, the long-distance signal transfer in soliton form was demonstrated. In case of ferromagnetic iron single crystal, we find that the magnon can be controlled with no bias field.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピン波 マグノン 磁性体

1. 研究開始当初の背景

半導体電子産業は目覚ましい発展を遂げ、高速の SSD ドライブ、1 テラバイトのフラッシュメモリーが登場し、従来は磁性体が独壇場としていた情報記録分野においても中核技術となった。半導体では信号を担う電荷キャリア濃度の制御およびゲーティングによる電荷キャリアフロー制御という技術革新により、多くの応用分野の開拓を成し遂げた。しかし、電子機器はエネルギー消費が急激に増大したため、省エネ性能と高性能化の両立という現代社会の要請にこたえることが徐々にできなくなってきている。一方、磁性体には磁石に代表されるようにエネルギーゼロで情報を保持できる特性があり、その性質と同様に低エネルギーで動作が可能な非電荷キャリア (= マグノン) が存在する。本研究では世界に先駆けて、マグノンを使って、電流ゼロ信号演算を可能にする非電荷トランジスタを実現する。

2. 研究の目的

磁性体におけるマグノン物性は近年の先端研究の一つであり、マグノンを使った信号演算では原理だけでは、数十 GHz 駆動でも既存 CMOS 体系に比べてエネルギー量が 1/100 で、素子面積 1/6 を実現できるという圧倒的な潜在力を持っている。しかし波としての性質を有するためにマグノンのトランジスタ応用の開拓は不十分である。電流を使わないトランジスタという革新的デバイス学術体系を打ち立てて世界をリードするため、本研究では、

(1) トランジスタ応用できる低損失マグノン材料素子の研究開発

(2) マグノンで信号処理を行う技術 (演算機能) の研究開発

に目的を定めて提案する。

3. 研究の方法

磁気的存在であるマグノンは絶縁体にも存在する。従来の電荷を使う電子機器では為しえない、演算中に電流を使用しない (ジュール発熱ゼロ) 素子を実現するため磁性絶縁体を積極活用する。磁性絶縁体 YIG は金属に比べてマグノン減衰が 1/100 程度と極めて小さく、ミリメートル試料ですら、NAND 原理を実証することができた。これを演算制御へ発展させるため、二重の周期を持ったメアンダ構造マグノン結晶を 75 マイクロメートル線幅で作製し、高速オシロスコープを用いて実時間波形でスピン波伝搬を観測した。マグノン結晶の作製する磁場との結合によってスピン波のオン・オフ (スイッチ) 機能を開発した。

一方、磁性絶縁体 YIG は非常に堅くて加工しにくく集積化への問題があったため、超高真空 5 源スパッタ装置に 800 度加熱機構を整備して、研究協力者から超高品質の磁性絶縁体をスパッタ合成できる技術を導入した。超高真空スパッタ装置およびアニーリング装置によってナノメートル級の膜厚であり、かつ低磁気損失を達成できるガーネット微細化試料を作製し、微細化 ϕ 型演算素子など任意形状を作製した。スピン波信号伝送制御という観点から、高品質スピン波信号伝送を数ミリメートルにわたって実現するためハイパワーアンプを用いて非線形効果をスピン波に生じさせ、スピン波をソリトンに変形させた。また、金属系試料においてトランジスタ技術を開拓するため、強磁性パーマロイを線幅 2 マイクロメートル程度に微細加工し、外部磁場を印加することで多磁区状態を制御した。磁壁構造を伝搬する新しいスピン波信号の検出を試みた。また、鉄単結晶を用いたスピン波伝搬において、これまでに検出できていなかったバックロードモードスピン波を、ベクトルネットワークアナライザを用いて時間分解 S パラメータ測定法という新しい手法で検出した。

4. 研究成果

本研究期間において、

- (1) 二つの異なる折り返し周期を有するメアンダ構造アンテナを作製し、電流を印加することで周期的磁場分布を磁性絶縁体試料に作り出した。周期磁場とスピン波との磁气的結合によってスピン波はブラッグ散乱を受けて反射される。磁場によって形成された反射バンドを従来研究よりも大きい 90 MHz 程度に増大させることに成功し、スピン波の波形広がり (分散) をすべてカバーすることができ、スピン波のオン・オフの信号比で 95% 制御を達成することができた (図 1、周期磁場との時期結合によるパケットの消滅)。国内外の従来研究ではスピン波パケットの広がり を考慮できておらず、本研究が実時間スピン波

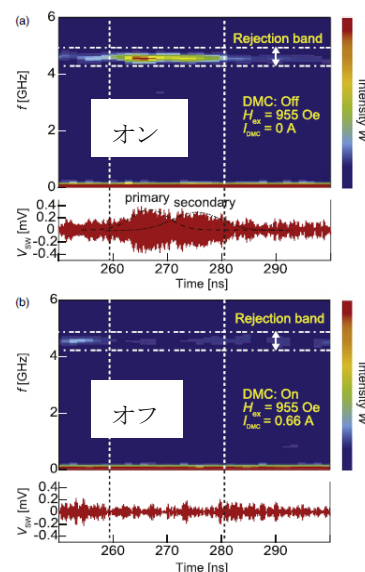


図 1 スピン波のスイッチング

パケットのスイッチを実現した初めての結果といえる。

- (2) スパッタ装置とアニール装置によって 50 ナノメートルから 100 ナノメートルの膜厚を持つ微細加工試料 YIG を作製することに成功した (図 2)。この薄膜の伝搬信号をネットワークアナライザによって測定することで、100 マイクロメートルは減衰することなく伝搬することが確認できた。またブリルアン散乱分光装置を用いて微細加工ガーネット (YIG) 試料におけるマグノン空間分布を測定し、スピン波の線幅方向の量子閉じ込め効果などを検出することに成功した。
- (3) 磁気ソリトン成長の基礎的成果を上げることができ、数ミリメートルにわたって明瞭な信号波形を保ったまま伝搬させることに成功した。これまでに、理論予測と一致していなかった非線形効果、4-ソリトン形成を観測することができ (図 3)、磁気ソリトン応用の可能性を広げた。また、複数のスピン波ソリトンが連なるソリントンレインに関する実験結果を取得することができ、従来技術では得られていなかった 10ns 程度の高密度転送ができることがわかった。
- (4) 強磁性パーマロイ細線を微細加工し、外部磁場により多磁区状態を制御した。その結果、磁壁の中を伝搬する新奇な数百メガヘルツ帯域のスピン波伝搬モードがあることがわかった。これまでに見つかった数ギガヘルツ帯域のスピン波ではなく、伝搬速度などが異なることがわかった。
- (5) 鉄単結晶におけるマグノン伝搬について、ネットワークアナライザを用いて実時間領域で検出した。これまでに観測できていなかったバックワードモードスピン波を検出することができ、その伝搬特性を解明した。面内の結晶磁気異方性によって無磁場でもスピン波を伝送できることがわかった (図 4)。

以上の結果は当初計画のトランジスタ完成という目的達成とまでにはなっていないが、トランジスタ技術の要といえるスピン波スイッチを開発したことは今後のマグノントランジスタ構築の基礎に成功したといえる。また、低磁気損失として有望な薄膜ガーネットおよび鉄単結晶を用いて新しいデバイス原理を開拓できた。バイアス磁場を必要としないスピン波伝搬制御という予想を超える結果も得られており、今後、マグノントランジスタ開発研究を支える十分な成果を挙げることができたと考えられる。

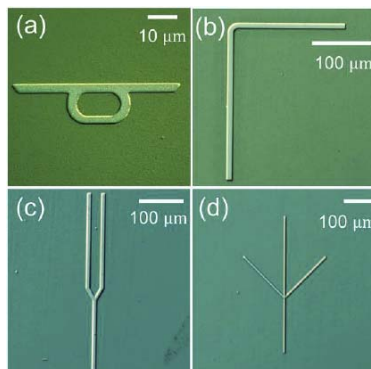


図 2 50 nm 膜厚 YIG 試料

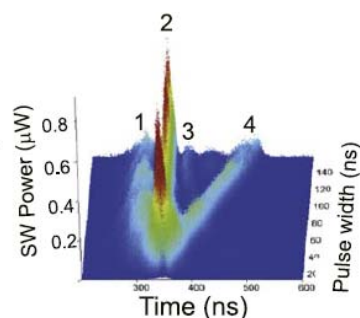


図 3 複数ソリトン形成の観測

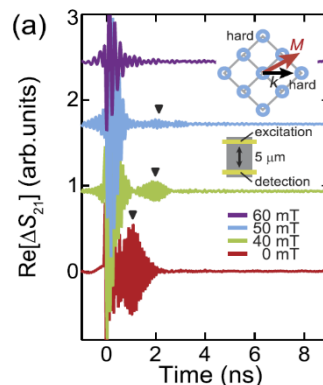


図 4 無磁場でのスピン波伝搬

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 根津 昇輝、関口 康爾	4. 巻 -
2. 論文標題 磁壁おけるスピン波伝播の研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本磁気学会誌	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Kawase Mikito, Iwaba Masashi, Sekiguchi Koji	4. 巻 59
2. 論文標題 Electric detection of nonlinear effect upon spin-wave spin current	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SEED01
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7567/1347-4065/ab6508	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 Tachizaki Takehiro, Mizuno Hiroyuki, Sekiguchi Koji	4. 巻 59
2. 論文標題 Numerical study on the enhancement of the magneto-optic Kerr effect using a dielectric thin film	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SEEA06
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7567/1347-4065/ab658c	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 Goto Taichi, Yoshimoto Takuya, Iwamoto Bungo, Shimada Kei, Ross Caroline A., Sekiguchi Koji, Granovsky Alexander B., Nakamura Yuichi, Uchida Hironaga, Inoue Mitsuteru	4. 巻 9
2. 論文標題 Three port logic gate using forward volume spin wave interference in a thin yttrium iron garnet film	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-019-52889-w	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 該当する

1. 著者名 岩場 雅司、藤原 早希、関口 康爾	4. 巻 4
2. 論文標題 ダブル・マグノン結晶を用いたバックワードスピン波遮断	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本磁気学会論文特集号	6. 最初と最後の頁 18~22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20819/msj tmsj .20TR409	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 K. Sekiguchi	4. 巻 28
2. 論文標題 The Basis of Magnon Transistors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AAPPS Bulletin	6. 最初と最後の頁 2-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22661/AAPPSBL.2018.28.3.02	査読の有無 無
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14件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 小屋祐真 , 関口康爾
2. 発表標題 鉄単結晶を用いたスピン波干渉による物理リザーバーの検討
3. 学会等名 第44回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩場雅司 , 関口康爾
2. 発表標題 周期的な変調磁場によるスピン波の減衰
3. 学会等名 第44回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 根津昇輝 , 関口康爾
2. 発表標題 磁壁おけるスピン波伝播の研究
3. 学会等名 第 4 4 回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 江口拓朗 , 苗村侑 , 関口康爾
2. 発表標題 スピン波伝送における磁化勾配効果の研究
3. 学会等名 第 4 4 回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小田鴻志 , 岩場雅司 , 関口康爾
2. 発表標題 時間分解ブリルアン散乱分光法によるマグノン生成過程の検出
3. 学会等名 第 4 4 回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古川諒 , 岩場雅司 , 関口康爾
2. 発表標題 マグノニックデバイスにおけるノイズ評価
3. 学会等名 第 4 4 回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Iwaba and K. Sekiguchi
2. 発表標題 Shape-forming of Spin wave Packets by dynamic magnonic crystal
3. 学会等名 MORIS2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Kawase, M. Iwaba and K. Sekiguchi
2. 発表標題 Time-domain detection of multiple spin-waves solitons generations
3. 学会等名 MORIS2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩場 雅司, 藤原 早希, 関口 康爾
2. 発表標題 多重マグノンニック結晶によるスピนว波スイッチング
3. 学会等名 第43回日本磁気学会(京都大学)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川瀬 幹登, 岩場 雅司, 関口 康爾
2. 発表標題 多重磁気ソリトン形成過程の時間領域測定
3. 学会等名 第43回日本磁気学会(京都大学)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Sekiguchi
2. 発表標題 Magnon transistor for next generation computing
3. 学会等名 第43回日本磁気学会(京都大学) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩場 雅司、藤原 早希、関口 康爾
2. 発表標題 パラメトリックポンピングによるスピン波励起のBLS分光測定
3. 学会等名 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Sekiguchi
2. 発表標題 Generation of fast propagating spin-wave for magnonic logic functions
3. 学会等名 Collaborative Conference on Materials Research (CCMR) 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Sekiguchi
2. 発表標題 Edge-mode Spin-wave Nonreciprocity for Magnonic Logic Functions
3. 学会等名 5th International Conference of Asian Union of Magnetics Societies (IcAUMS 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

横浜国立大学 理工学部/理工学府 関口研究室
<http://www.spin.ynu.ac.jp/papers2.html>

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
研究協力者	介川 裕章 (Sukegawa Hiroaki)		
研究協力者	後藤 太一 (Goto Taichi)		

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