

高周波スピントロニクスの研究

Research on the high frequency spintronics

鈴木 義茂 (SUZUKI YOSHISHIGE)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授



研究の概要

近年、固体中の電荷のみでなくスピンの流れを制御することが可能となってきた。本研究では、磁化が磁場や交換相互作用のもとで示す GHz から THz にいたる歳差運動をスピン流の注入によって励起することを原理とする「高周波スピントロニクス」の学理を確立し、半導体を凌駕する性能を持つスピントルクダイオードなどの新素子を生み出す。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学 / 工学基礎・応用物性 / 結晶工学

キーワード：①スピントロニクス②磁気共鳴③ダイオード④スピントルク⑤磁気異方性

1. 研究開始当初の背景

「スピントロニクス」という新しい科学技術分野に興味が集まっている。一つの理由は、電子が持つスピンの自由度を利用することにより C-MOS 技術が直面している困難を解決できるとの期待からである。もうひとつの理由は、科学の種々の分野で電子スピンの物理が重要な研究課題となっているからである。

さて、スピントロニクスの分野における中心的な素子は巨大磁気抵抗素子、および、トンネル磁気抵抗素子(図1参照)である。これらの素子は磁気ハードディスクの読み出しセンサーや固体磁気 RAM(M-RAM)の磁気セルとして既に実用化されている。しかし、総じてその応用範囲はスピンの関わる科学全体からみれば狭い範囲に限られていた。

2. 研究の目的

磁化が磁場や交換相互作用のもとで示す GHz から THz にいたる歳差運動をスピン流の注入によって励起することを原理とする「高周波スピントロニクス」の学理を確立する。このことにより、高性能トンネル磁気抵抗素子をベースとして高出力、high-Q あるいは超 100 GHz の発振器、半導体を凌駕する感度をもつ検波器、50 nm というナノサイズで 10 nT という磁場感度を室温で示し単一の超常磁性微粒子が作るダイポール磁場を検出できる磁気センサーを実現する。さらには、単一の電子スピンの作るダイポール磁場の検出をも目指す。この研究の成果は、磁気記

録の限界を打破するのみでなく化学、生物物理、医療、創薬などの他分野に波及するものと期待される。

3. 研究の方法

本研究は大きく 3 つのテーマに分かれる。1 つめは高性能スピントルク発振器(STO)の研究であり、2 つめはスピントルク発振器をベースとした超高感度磁場センサーの研究である。そして、最後のテーマは、超高感度スピントルクダイオードの研究である。これらの研究では低抵抗で高磁気抵抗比を示す磁気抵抗膜、高精度微細加工技術の開発、さらに異方性の制御された高品質薄膜の作製が共通の基盤技術となる。発振の高純度化、センサーの高感度化のために発振波形の実時間測定による位相ゆらぎの原因の特定と制御を行う。ダイオードに関してはノイズの発生機構の特定とその制御を行う。さらに、微小コンタクトダイオードの作製を行い少数または単一の磁性微粒子やラジカル分子のスピン流による磁気共鳴測定とそのコヒーレントな制御を試みる。

4. これまでの成果

STO についてはソンプレロ型という新構造を提案することにより、現在、世界的に最も高い発振出力(2.4 μ W)と高い Q 値(350)を兼ね備えた優れた素子を実現した。また、垂直磁場の印可により 3,200 というトンネル接合を用いた STO では世界最高の Q 値を得た。

さらに、そのスペクトルは強力な高調波を含み最大 62.5 GHz の発振出力を得た。この周波数は所有する測定器の限界であり、さらに高い周波数の出力が期待できる。

また、磁気渦型の発振器において、3 μW とこれまでの同型の素子の 60 倍の発振出力を実現した。また、本素子は外部信号に位相ロックし、その時の Q 値は 54,000 に達した。

STO を磁場センサーとして用いる実験を行った。その結果、100 nm \times 150 nm の素子において位相検出を行うことにより 185 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ という感度を得た。感度は素子体積の平方根に反比例することから、これは、1 mm の素子に換算すると約 20 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ に対応する超高感度である。

磁気異方性の制御された FeB を用いてトンネル接合素子を作製することにより、超高感度スピントルクダイオードを実現した。その検波感度は 12,000 V/W であり、半導体の約 3 倍である。詳細なノイズの解析から、スピントルクダイオードでは磁化の熱揺らぎによるノイズが、素子内で非線形に絡み合っているノイズ(非線形マグノイズと命名)が支配的であることを見出した。このノイズを考慮した結果、スピントルクダイオードは信号雑音比においても半導体ダイオードを凌駕することを見出した。

超常磁性微粒子のスピントルクダイオード効果を測定し、粒子が小さくなるほど信号が大きくなることを見出した。

5. 今後の計画

STO の発振周波数の高周波化に関しては、より高い周波数範囲に対応できるシステムを使って測定を行う。高い磁気異方性を用いた薄膜の作製も順調に進んでおり、この薄膜を STO の発振層に組み込むことで数 10-100 GHz の高い周波数の発振が期待できる。

複数 STO のアレイ化による高出力化に関しては、ボルテックス型 STO を中心に研究を進める。すでに単体で 3 μW 程度の高出力が得られているため、数 10-100 個程度の STO をアレイ化することにより、発振出力 100 μW を目指す。

STO 磁場センサーについては、素子の最適化設計を行い感度の向上を図る。また、新しく磁気共鳴を利用した動的磁場の検出を試みる。具体的には磁気トンネル接合のフリー層と超常磁性微粒子の共鳴周波数を一致させた共鳴検出を試みる。

スピントルクダイオードの高感度化については既に目標をほぼ達成した。今後、非線形ノイズと確率共鳴の研究を深め、非線形磁気共鳴の学理の確立およびナノスピントロニクスデバイスの熱力学的な極限についての学理の構築に努める。

超常磁性クラスターを用いた、スピントルクダイオード効果による磁気共鳴検出では Q

値がわずか 3 程度であった。今後、粒子間相互作用を減らした素子を作製する。その上で微粒子にはたらくスピニアキュムレーションおよびトルクの詳細評価を行う。

ダイオード効果による常磁性スピンの検出に関しては引き続き大面積接合に対して磁気共鳴による評価を行う。それにより分子スピンと非磁性金属との相互作用の要因を解明し、これを用いた分子スピンの検出・制御を目指す。これらによりプロジェクトの目標を達成する予定である。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

1. S. Miwa, S. Ishibashi, H. Tomita, T. Nozaki, E. Tamura, K. Ando, N. Mizuochi, T. Saruya, H. Kubota, K. Yakushiji, T. Taniguchi, H. Imamura, A. Fukushima, S. Yuasa, Y. Suzuki*, "Highly sensitive nanoscale spin-torque diode", Nature Materials, 13,50-56 (2014)
2. H. Maehara*, H. Kubota, *et al.*, "High Q factor over 3000 due to out-of-plane precession in nano-contact spin-torque oscillator based on magnetic tunnel junctions", Appl. Phys. Exp., 7,023003 (2014)
3. H. Maehara*, H. Kubota, *et al.*, "Large Emission Power over 2 μW with High Q Factor Obtained from Nanocontact Magnetic-Tunnel-Junction-Based Spin Torque Oscillator", Appl. Phys. Exp., 6, 113005 (2013).
4. S. Miwa*, Y. Fujii, H. Kubota, Y. Suzuki, *et al.*, "Nonlinear thermal effect on sub-gigahertz ferromagnetic resonance in magnetic tunnel junction", Appl. Phys. Lett. 103, 042404 (2013)
5. Z. Tang, M. Shiraishi*, *et al.*, "Dynamically-generated pure spin current in graphene", Phys. Rev. B87, 140401(R) (2013) [Editor's Suggestion].
6. E. Shikoh, M. Shiraishi*, *et al.*, "Spin-pumping-induced spin transport in p-type Si at room temperature", Phys. Rev. Lett. 110, 127201 (2013) [Editor's Suggestion & Spotlighting Exceptional Research].
7. S. Miwa*, Y. Suzuki, *et al.*, "Enhancement of Spin Diode Signals from Fe Nanoparticles in MgO-Based Magnetic Tunnel Junctions", Appl. Phys. Express 5, 123001 (2012)
8. H. Arai, H. Imamura*, *et al.*, "Spin-wave excitations induced by spin current through a magnetic point contact with a confined domain wall" Applied Physics Letters 101, 092405 (2012). 他 原著論文計 24 件.
9. 平成 25 年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞(研究部門), 鈴木義茂,
10. 日本磁気学会 2011 優秀研究賞, 鈴木義茂, ホームページ等 : [http://www.suzukiylab. mp.es.osaka-u.ac.jp/kiban_s/index.html](http://www.suzukiylab.mp.es.osaka-u.ac.jp/kiban_s/index.html)