

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360017

研究課題名(和文) 走査スピン注入プローブを用いた局所磁気共鳴励起

研究課題名(英文) local magnetic resonance excitation by using scanning spin injection probe

研究代表者

AN TOSHU (安東秀) (Toshu, An)

独立行政法人理化学研究所・Kim表面界面科学研究室・研究員

研究者番号：70500031

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 16,200,000円、(間接経費) 4,860,000円

研究成果の概要(和文)：局所的にスピンを注入してスピントルクを磁性体に印加して発振現象を誘起する走査マイクロ波プローブの開発を行った。この際に、極細の高周波同軸線(外径0.33ミリメートル)をプローブ探針として水晶振動子に接着したマイクロ波源付水晶振動子型AFMを開発して用いた。これにより試料が絶縁体であっても表面を精細に走査しながら10ギガヘルツまでの高周波を印加できる高周波プローブ顕微鏡を開発し、走査磁気共鳴検出プローブを用いて、MTJ(磁気トンネル接合)積層薄膜からのスピン注入発振の計測の実現に注力した。

研究成果の概要(英文)：Scanning microwave probe, which can inject spin locally and apply spin torque to the magnet, has developed. Very thin high-frequency coaxial cable was used as the microwave source and detector of up to 10 GHz, and local excitation and detection of spin transfer torque oscillation was studied on the magnetic tunnel junction layers by injecting spin from the probe.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、薄膜・表面界面物性

キーワード：スピンエレクトロニクス 磁気共鳴 スピントルク 走査プローブ顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

本提案以前にも走査プローブ顕微鏡を用いた磁気共鳴によるスピン検出手法は幾つか報告されていたが、計測する周波数帯域は1ギガヘルツ未満であり本研究で構築する10ギガヘルツまでの高周波計測回路には対応していなかった。さらにこれらの手法は、例えば熱的に励起された小さな振幅のスピン歳差運動を観測する等であり信号検出感度が低いという課題があった。

2. 研究の目的

走査プローブ顕微鏡の探針を用いて探針直下の試料表面近傍の局所領域のみにスピン偏極電流を注入し、スピン注入による強磁性共鳴及びスピン注入による磁気共鳴の発振(スピン注入発振)を励起・検出する。これまでに開発した高周波プローブを用いた走査磁気共鳴顕微鏡技術、及び、極低温・超高真空下で動作する水晶振動子原子間力顕微鏡技術を融合して安定なスピン偏極電流注入が可能な走査プローブ顕微鏡システムを構築する。これによりスピンドイナミクス検出の空間分解能をナノスケールにまで飛躍的に高め、得られた知見によりナノスピンドイナミクスの機構解明に大きく貢献する。

3. 研究の方法

(1)高周波対応プローブを用いた磁気トンネル接合(MTJ)素子からのスピン注入発振の観測 高周波対応プローブを用いて MTJ(磁気トンネル接合)積層薄膜からのスピン注入発振の検出に取り組む。探針から局所に注入された電流は磁性固定層でスピン偏極電流を生成しトンネルバリア層を介して磁性フリー層へスピン注入トルクを及ぼし、磁性フリー層内の局所磁化に磁気共鳴、及び、発振を励起する。この際、MTJ 積層膜の最上層を Au 膜で保護することにより大気中での計測が可能である。MTJ 積層膜には、Fe(001)/MgO(001)/Fe(001) エピタキシャル層、または、パーマロイ(Py)による Py/MgO(001)/Py 層を用いる。用いられる磁気トンネル接合(MTJ)素子の基板となるコプレーナウェーブガイドは、試料側への高周波信号の入出力を可能にするが、絶縁体領域を含むため、粗動機構により MTJ 素子位置を確認する際には試料の導電性に影響されない探針 - 試料間距離の制御機構が必要であり、開発を進めてきた走査磁気共鳴顕微鏡装置を改良し、絶縁体表面を走査可能で、且つ、10 GHz までの高周波に対応した原子間力顕微鏡(AFM)システムを高周波同軸線と水晶振動子を用いて開発する。

(2)スピン偏極(SP) - 探針を用いたスピン注入発振の観測

超高真空環境中で探針をスピン偏極源として用いる手法を試みる。この場合、探針及び試料作成法はスピン偏極 STM(SP-STM) の研

究で用いられる方法を利用し真空加熱と蒸着等により探針先端に Fe や Cr 等の磁性膜を作成する。これらの探針は、酸化によるスピン偏極トンネル確率の低下を防ぐために、超高真空槽内で作成され大気にさらされること無くその場観察される。まず、Fe, Co, Mn, パーマロイ(Py)等の磁性膜を作成して試料に用い、超高真空中で探針先端よりスピン偏極電流を印加してスピン注入発振の検出を達成する。その後、磁性膜のサイズを二次元島、少数原子クラスターへと徐々に小さくし、究極には単一や数個の磁性原子を作成する(孤立磁性原子は、低温に冷却された清浄試料表面へ磁性原子を蒸着することにより作成可能である。)このように、磁性原子の数を様々に変化させて少数の磁性原子において励起される磁気共鳴やスピン波を検出する。

4. 研究成果

(1)高周波対応プローブを用いた磁気トンネル接合(MTJ)素子からのスピン注入発振の観測

磁気共鳴用高周波プローブを用いて、MTJ(磁気トンネル接合)積層薄膜においてスピン注入発振の実現に注力した。MTJ 素子には Co40Fe40B20 のフリー層と固定相で形成される磁性層を用いた。磁気トンネル接合(MTJ)素子の基盤は絶縁体領域を含むため粗動機構により MTJ 素子位置を確認するために試料の導電性に影響されない探針 - 試料間距離の制御機構を有し、且つ、絶縁体表面を走査可能で 10 ギガヘルツまでの高周波に対応した原子間力顕微鏡(AFM)システムを構築した。この際に、極細の高周波同軸線(外径 0.33 ミリメートル)をプローブ探針として水晶振動子に接着したマイクロ波源付水晶振動子型 AFM を開発した(図1)。その後、AFM による表面観測のパラメータ調整を行い、先ず素子の電極位置にプローブを位置合わせして走査するために、光学顕微鏡等を用いた補助機構も導入し、プローブからのスピン注入発振の検出に取り組んだ。結果として、スピン注入発振の計測には成功していないが、プローブと探針間の安定した電流を得るためのさらなるパラメータの調整と、低ノイズ高周波増幅器の導入による高感度化を検討した。



図1、マイクロ波源付水晶振動子型 AFM

(2) 超高真空中でのスピン注入発振観測

電極の酸化を防ぐことが可能となる超高真空環境でスピン注入が観測可能な高周波走査プローブ顕微鏡装置を整備した。超高真空環境内にマイクロ波を導入しスピン偏極探針を用いたスピン注入源を含む高周波回路を導入して高周波信号を計測できることを確認した。原子レベルの分解能でのスピン注入発振の観測には成功していないが、スピン偏極探針に磁性薄膜ではなくバルククロム探針を使用すること、良質な磁性薄膜を表面に蒸着して作成するパラメータを調整して改良を進めた。

(3) スピン注入方の開拓

本研究提案である界面を介してスピンを注入する方法の逆効果として磁気共鳴を励起してスピンを注入する方法（スピンポンピング）があり、この効果をプローブを用いて計測する手法についても研究を行った。研究期間中に関連する研究でプラチナと磁性絶縁体のイットリウム鉄ガーネットの界面の質がスピンポンピングによるスピン注入効率に大きく影響し、界面の質が重要であることを示した。また、関連して熱とスピンの相互作用によりスピントルクを印加する現象と、スピンの波であるスピン波を用いて熱を移送できることを見出した（図2）。

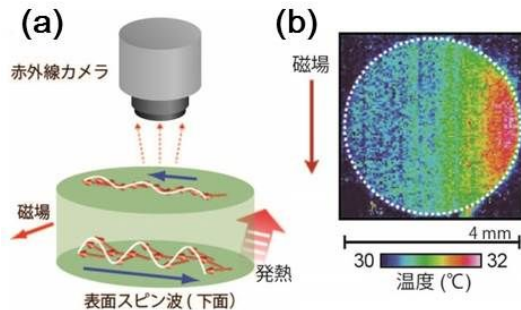


図2、スピン波熱移送効果の観測

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計5件）

T. An, K. Yamaguchi, K. Uchida, and E. Saitoh, Thermal imaging of standing waves, Applied Physics Letters, 査読有, Vol. 103, 2013, pp. 052410 1-3, DOI:10.1063/1.4816737

Z. Qiu, K. Ando, K. Uchida, Y. Kajiwara, R. Takahashi, H. Nakayama, T. An, Y. Fujikawa, and E. Saitoh, Spin mixing conductance at a well-controlled platinum/yttrium iron garnet interface, Applied Physics Letters, 査読有, Vol. 103, 2013, pp. 092404 1-4, DOI: 10.1063/1.4819460

Y. Kajiwara, K. Uchida, D. Kikuchi, T. An, Y. Fujikawa, and E. Saitoh, Spin-relaxation modulation and spin-pumping control by transverse spin-wave spin current in $Y_3Fe_5O_{12}$, Applied Physics Letters, 査読有, Vol. 103, 2013, pp. 052404 1-4

DOI:10.1063/1.4817076

T. An, V. I. Vasyuchka, K. Uchida, A. V. Chumak, K. Yamaguchi, K. Harii, J. Ohe, M. B. Jungfleisch, Y. Kajiwara, H. Adachi, B. Hillebrands, S. Maekawa, and E. Saitoh, Unidirectional spin-wave heat conveyer, Nature Materials, 査読有, Vol. 12, 2013, pp. 549-553

DOI: 10.1038/nmat3628

M. B. Jungfleisch, T. An, K. Ando, Y. Kajiwara, K. Uchida, V. I. Vasyuchka, A. V. Chumak, A. A. Serga, E. Saitoh, and B. Hillebrands, Heat-induced damping modification in yttrium iron garnet/platinum hetero-structures, Applied Physics Letters, 査読有, Vol. 102, 2013, pp. 062417 1-4

DOI: 10.1063/1.4792701

〔学会発表〕（計3件）

T. An, K. Uchida, K. Yamaguchi, K. Harii, J. Ohe, Y. Kajiwara, H. Adachi, B. Hillebrands, S. Maekawa, and E. Saitoh, “Spin-wave heat conveyer”, Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors (PASPS)-18, Osaka University, Japan, December 10th, 2013.

T. An, K. Uchida, K. Yamaguchi, K. Harii, J. Ohe, Y. Kajiwara, H. Adachi, B. Hillebrands, S. Maekawa, and E. Saitoh, “Unidirectional spin-wave heat conveyer”, Magnetism and Optics Research International Symposium (MORIS), OMIYA SONIC CITY, Saitama, Japan, December 5th, 2013.

安東秀, 内田健一, 山口和也, 針井一哉, 大江純一郎, 梶原瑛祐, 安立裕人, 前川禎通, 齊藤英治, 応用物理学会スピントロニクス研究会・日本磁気学会スピントロニクス専門研究会共同主催研究会「元素戦略、環境調和を視野に入れたスピントロニクスの新展開」2013年11月11日、東北大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安東秀 (Toshu An)

独立行政法人理化学研究所・Kim 表面界面科学研究室・研究員

研究者番号：705000317

(3) 連携研究者

齊藤英治 (Eiji Saitoh)
東北大学・金属材料研究所・教授
研究者番号：80338251

水口 将輝 (Masaki Mizuguchi)
東北大学・金属材料研究所・准教授
研究者番号：50397759

藤川 安仁 (Yasunori Fujikawa)
弘前大学・理工学部物理学科・教授
研究者番号：70312642

安藤 和也 (Kazuya Ando)
慶応大学・理工学部物理情報工学科・専任
講師
研究者番号：30579610