

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：12201
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2014～2016
課題番号：26790047
研究課題名（和文）ナノプローブによるスピン流イメージング

研究課題名（英文）Spin current imaging by nanoprobes

研究代表者

佐久間 洋志（Sakuma, Hiroshi）

宇都宮大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：40375522

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：先を鋭く尖らせた金属の針（ナノプローブ）を用いて、スピン流をナノメートルスケールで可視化することを目標とした。研究期間内には、 piezo素子を用いたナノプローブ計測システムの開発、プローブによる表面電位の測定手法の確立、測定試料として半導体上への金属細線の形成、高品質な金属細線クロス作製の作製、金属/酸化物グラニューラ薄膜における電流パスの可視化、永久磁石を用いた高安定・低発熱磁場発生装置の開発を行った。

研究成果の概要（英文）：We have set our sights on the nanoscale imaging of spin current by nanoprobes. In the duration of this project, following tasks were performed. A nanoprobe measurement system using piezo positioners was developed. A technique for the measurement of surface voltage was established. Techniques for the fabrication of metal microwires on semiconductor wafers and the crosses of metal microwires were established. The current path imaging of ferromagnetic nanoparticulate film was performed using the developed nanoprobe system. A magnetic field source with high stability and low heat generation was developed for the nanoprobe measurements.

研究分野：磁気工学

キーワード：スピン流 piezoポジショナー 表面電位 イメージング

1. 研究開始当初の背景

電子の流れである電流は古くから知られているが、電子スピンの流れ、スピン流の存在が知られるようになったのはごく最近である。実験的には、2000年代初めに強磁性金属細線と常磁性金属細線の接合において観測されて以来、注目を集めている。上向きスピンを持った電子と下向きスピンを持った電子が逆向きに流れると、正味の電流は流れずにスピンだけが流れることになり、ジュール熱の発生しない超低消費電力のデバイスを開発できる可能性がある。

スピン流の発生にはスピン軌道相互作用が深く関わっていると考えられているが、まだよく理解されていない。我々は、スピン流の理解を深めるためには、以下の二つのことが必要であると考えている。(1) ナノスケールでの測定、(2) 二次元的な分布測定(イメージング)である。前述の例では、微細加工で作る細線の間隔を変化させれば、一次元的な変化は調べることができるが、1 nm オーダーの変化や二次元分布を測定することは難しい。一方、スピン流測定のもう一つのバリエーションとして、半導体細線に電場と磁場を加えたときに細線の両端に生じるスピン流を光学的に観測した例がある。スピン分布のイメージングに成功しているものの、スケールはマイクロメートルオーダーである。

2. 研究の目的

本研究では、スピン流をナノメートルスケールで可視化(イメージング)することを目指した。前述の強磁性金属細線と常磁性金属細線の接合におけるスピン流観測では、微細加工した強磁性細線が言わば検出器である。これを自在に動かせるナノプローブに置き換えれば、これまで見るができなかった、常磁性細線内のナノスケールスピン流分布を可視化できるのではないかと考えた。特に、スピン流源である強磁性体に磁区があり、磁気モーメントがいろいろな方向を向いている場合、常磁性金属に生じるスピン流も複雑なパターンになると予想され、これを観測したいと考えた。

3. 研究の方法

独自のプローブ計測システムを用いてスピン流の測定を試みた。図1に測定システムのブロック図を示す。システムは大きく分けて3つの部分からなる；3次元自動ステージによるプローブ駆動部、電流源と電圧計からなる計測部、ソレノイド・マグネット、電源、ホール素子からなるマグネット部である。研究開始当初はプローブの粗動機構として、手動3次元ステージにステッピングモーターを取り付けて自動化したものをしていたが、後述の理由により、ピエゾポジショナーに変更した。

測定対象として、非磁性半導体であるガリ

ウムヒ素上に強磁性金属である鉄の細線を形成したもの、非磁性金属である銅の細線と強磁性の鉄細線を交差させたもの、加えてスピン流測定の予備実験のために鉄ナノ粒子堆積膜を用いた。

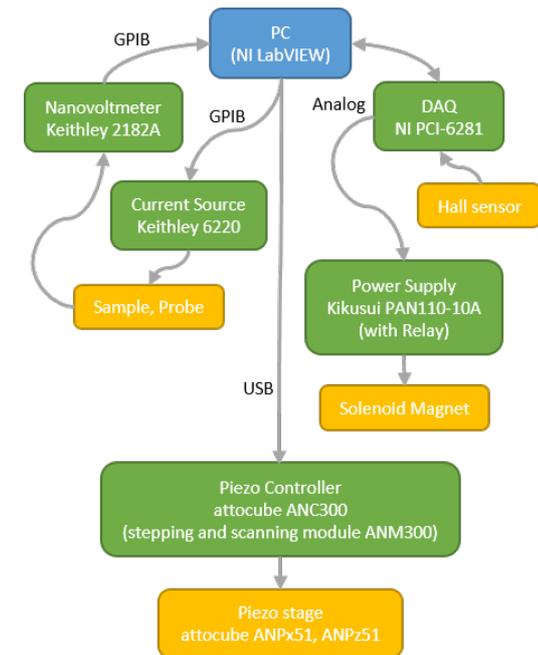


図1 スピン流測定のためのプローブ計測システムのブロック図

4. 研究成果

(1) 強磁性金属/常磁性半導体接合部の形状イメージング

測定対象としてまず、ガリウムヒ素上に鉄細線を形成したものをを用いた。これは、鉄細線に電流を流したときにガリウムヒ素にスピン流が染み出すことを期待したものである。

スピン流はスピン流源から遠くても数マイクロメートル以内で消失してしまうため、スピン流源(強磁性体)とスピン流が流れる媒体(常磁性体)の境界をナノメートル精度で検出する必要がある。また、プローブを常磁性体表面に接触させてスピン流に起因した電圧を測定するが、この動作もナノメートル精度で制御しなければプローブの先端がつぶれてしまい、位置の分解能を落としてしまう。ナノメートルの領域であるので、光学顕微鏡では観察することが難しく、電気的に検出する必要がある。

そこでまず、強磁性金属と常磁性半導体上でプローブを近づけていったときに電圧がどのように変化するかを調べた。その結果、強磁性金属上では10ナノメートル以内で急激に電圧が変化するが、常磁性半導体上では約1マイクロメートルに渡って緩慢な電圧変化が観測された。このことは強磁性金属/常磁性半導体の境界を見つける上では有利であるが、常磁性半導体の表面を決定する上で

は問題である。

一方、試料面内方向に関しては、表面電位を測定しながらプローブを走査することにより、ガリウムヒ素と鉄の境界をナノメートルスケールで検出することに成功した。図2にこのようにして測定したガリウムヒ素上の鉄細線の形状像を示す。

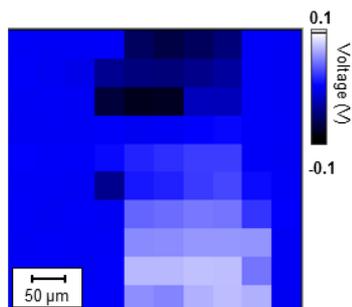


図2 プローブ測定によるガリウムヒ素上の鉄細線の形状像

(2) ピエゾポジショナーによる3次元ステージの構築

これまで使用してきた計測システムでは粗動機構として、ステッピングモーターで駆動するネジ式の3次元ステージ、微動機構として圧電素子を用いていた。このような粗動機構はギアやネジの遊びをゼロにすることが原理的に不可能であり、マイクロメートルオーダーでプローブの位置制御を行うことが難しい(1マイクロメートル以下の制御は微動機構が担う)。

スピンの発生源から数マイクロメートル以内で消失してしまうことから、マイクロメートルオーダーの位置制御が必須である。そこで、粗動機構を圧電素子を用いたシステムに置き換えた。圧電素子の伸びは1マイクロメートル程度であるが、圧電素子を急激に縮めると、ステージは慣性力でその位置に留まる。摩擦力による移動と慣性力による保持をうまく制御することによりミリメートルオーダーの移動が可能になる。圧電素子を用いているため、ナノメートルオーダーの微動も可能である。このシステムを導入することにより、装置構造がシンプルかつ小さくなり、磁場方向など測定の自由度も上がった。図3に構築した3次元ステージを示す。

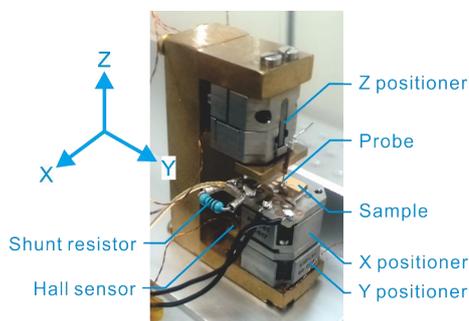


図3 ピエゾポジショナーを用いた3次元ステージ

ジ

しかしながら、粗動モードと微動モードをシームレスに連動するには独自のプログラムを開発する必要があった。モードを変更する場合には、電圧を初期値に戻す必要があり、また急激に移動すると滑ってしまうためである。さらに、圧電素子に加える電圧に対する移動量も荷重等の条件によって変化するため、測定する必要があった。そこで専用の標準試料をCNCフライス盤を用いて作製し、自動で移動量の校正を行うプログラムを開発した。

(3) 蒸着法による強磁性金属/常磁性金属細線クロスの作製

これまで測定対象として、常磁性半導体上に形成した強磁性金属細線を用いていた。これは、半導体と金属の抵抗率の差を利用して、電流を金属細線内に制限しつつ、半導体に染み出すスピン流を観測することを狙ったものである。しかしながら、半導体表面の検出実験で明らかになったように、半導体の高い抵抗率は表面電位の測定、結果としてスピン流の測定に不利であるため、常磁性半導体を常磁性金属の細線へ変更した。これまでは一つのマスクだけで試料作製が完了していたが、高品質な金属細線クロスを作製するには、真空チャンバー内でマスクを回転させる必要がある。そこで、ステッピングモーターを用いたマスク回転機構を作製した。図4にこのシステムを用いて作製した鉄/銅細線クロスを示す。

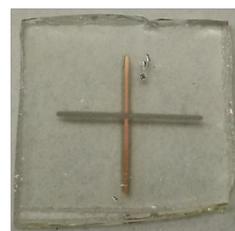


図4 マスク回転機構を備えた電子ビーム蒸着装置により作製した鉄/銅細線クロス

(4) 金属/酸化物グラニューラー薄膜における電流パスの可視化

残念ながら未だスピンの測定には至っていないが、構築したプローブ測定システムの有用性を示すために、金属/酸化物グラニューラー薄膜における電流パスの可視化を試みた。

試料として、ガスフローパッタ法により作製したFeナノ粒子堆積膜を用いた。数百nm以下の大きさのFeナノ粒子が点在しており、その周辺に数nmの微細なFeナノ粒子が基板全体を覆っている。微細なFeナノ粒子は自然酸化により、粗大なナノ粒子部分に比べて抵抗率が高いと考えられる。

このような極薄のナノ粒子堆積膜においては、電流は抵抗の低い部分(粗大な粒子の

部分)を選択的に流れ、それ以外の部分にはほとんど流れないと考えられる。電流が流れている部分では電位が高くなるため、これまで確立した表面電位の測定技術を用いれば、電流パスを可視化することが可能である。また、外部磁場により Fe ナノ粒子の磁化方向を変化させると、磁気抵抗効果により電流パスが変化する可能性もある。図5は外部磁場を変化させながら測定した電位と形状のイメージである。磁場による電流パスの変化は観測されなかったが、電流パスを再現性良く測定できていることがわかる。

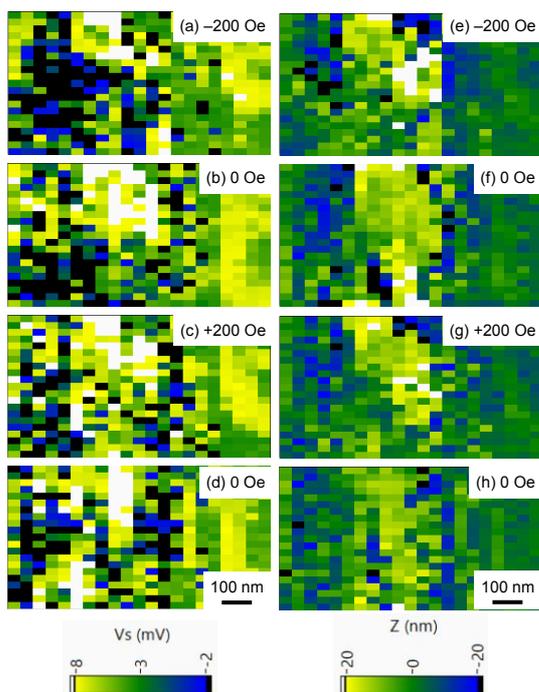


図5 Fe ナノ粒子堆積膜の電位イメージ(左)および形状イメージ(右)

(5) 永久磁石を用いた磁場発生装置の開発
 プローブ測定においては、1 フレームの画像を得るのに比較的長時間を要するため、磁場を印加する場合は時間的に安定である必要がある。また、ほとんどの場合プローブの微動機構に piezo素子を用いる(本研究のように粗動機構にも用いる場合もある)が、piezo素子は温度による特性の変化が非常に大きいので、その近傍に置かれる磁場源は低発熱であることが要求される。

前述の Fe ナノ粒子堆積膜における電流パスの可視化実験においては、磁場による変化は観測されなかったが、この原因の一つに加える磁場が弱かったことが挙げられる。電磁石自体はより強い磁場を発生することが可能だったが、水冷の性能が低かったため発熱し、その熱が空気を通して piezo素子に伝わり、観察位置がずれてしまった。

このような問題を解決するために、ジュール熱の発生がない永久磁石を用いて任意の強さの磁場を加えることを考えた。図6に示

すように、4つのネオジウム磁石をステッピングモーターにより回転させることにより、±1000 Oe の範囲の任意の磁場を発生可能な装置を開発した。

今後も、これまで得た知見と開発してきた装置を用いて、当初の目標であったスピン流のナノスケールイメージングを試みていく。

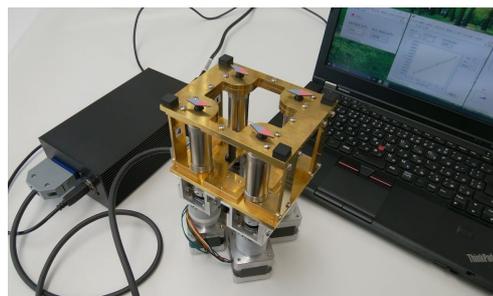


図6 永久磁石を用いた磁場発生装置

<引用文献>

F. J. Jedema, A. T. Filip, and B. J. van Wees, Electrical spin injection and accumulation at room temperature in an all-metal mesoscopic spin valve, *Nature*, Vol.410, pp.345-348 (2001).
 Y. K. Kato, R. C. Myers, A. C. Gossard, and D. D. Awschalom, Observation of the Spin Hall Effect in Semiconductors, *Science*, Vol.306, pp.1910-1913 (2004).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計1件)

佐久間洋志, 植野慎平, 石井 清, ナノプローブ磁気伝導計測システムの構築と Fe ナノ粒子膜における電流パスの可視化, 電気学会論文誌 A, 査読有, Vol. 137, No. 7, (2017) (掲載決定)

[学会発表](計6件)

岩間三典, 渡辺浩平, 佐久間洋志, 石井 清, ナノプローブによるスピン流イメージングのための強磁性金属/半導体境界の検出
 平成 26 年電気学会基礎・材料・共通部門大会, 信州大学(長野県・長野市), 2014 年 8 月 21 日, 講演番号 21-B-a2-2
 北村貴仁, 佐久間洋志, 石井 清, 永久磁石を用いた磁場発生装置における磁石配置の最適化, 第 24 回日本 MRS 年次大会, 横浜情報文化センター(神奈川県・横浜市), 2014 年 12 月 10 日, 講演番号 I-P10-023
 植野慎平, 渡辺浩平, 佐久間洋志, 石井 清, piezoポジショナーの粗動/微動同時制御, 第 6 回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, 前橋工科大学(群馬県・前橋市), 2016 年 3 月 1 日
 佐久間洋志, 植野慎平, 石井 清, ナノプローブ磁気伝導計測システムの構築と Fe

ナノ粒子膜における電流パスの可視化 ,平成 28 年電気学会基礎・材料・共通部門大会,九州工業大学(福岡県・北九州市),2016 年 9 月 5 日,講演番号 5-B-a1-3
酒井 奏,小暮恵介,佐久間洋志,電子ビーム蒸着による金属細線クロスの作製 ,第 7 回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会,足利工業大学(栃木県・足利市),2017 年 3 月 2 日,講演番号 ETT/ETG-17-41
羽根田海生,植野慎平,渡邊浩平,佐久間洋志,ナノポジショナーの粗動機構における自動較正プログラムの開発 ,第 7 回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会,足利工業大学(栃木県・足利市),2017 年 3 月 2 日,講演番号 ETT/ETG-17-42

〔その他〕

ホームページ

<http://sakuhiro.way-nifty.com/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐久間 洋志 (SAKUMA, Hiroshi)

宇都宮大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：4 0 3 7 5 5 2 2