

## 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：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13358

研究課題名(和文)多探針STMを用いた純スピン流プローブの開発

研究課題名(英文)Development of pure spin injection probe using multiprobe STM

研究代表者

保原 麗 (Hobara, Rei)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・特任研究員

研究者番号：30568176

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：電荷電流を伴わない純スピン流を任意の場所に注入できる純スピン注入プローブの開発を行った。プローブ先端からスピン拡散長以内の距離に強磁性体・常磁性体を作成し、界面に流す電流を回収することで試料にはスピン流のみを流すことが可能となった。また、このプローブを用いて逆スピンホール効果を測定することで純スピン注入の実証を行った。

研究成果の概要(英文)：We developed the pure spin injection probe without charge current injection. By making ferromagnetic / paramagnetic interface within the spin diffusion length from probe tip, and recollect the current flowing that interface, pure spin current can become to be injected to the sample. We also demonstrated the spin injection of this probe by measuring inverse spin hall effect.

研究分野：薄膜・表面界面物性

キーワード：SPM スピン物性 スピントロニクス

### 1. 研究開始当初の背景

従来の半導体プロセス技術を用いたスピン流の生成・検出技術は、「基板上に生成された回路」により、「基板上に生成されたデバイス」を測るものであり、物質表面でのスピン物性測定、デバイス内部におけるスピンの振舞いなど、その場観察を行うのは不可能であった。

磁性探針によるスピン偏極電流の注入や、逆スピンホール効果によるスピン流注入により、空間分解したスピン注入を行う方法もあるが、これはスピンと同時に電荷電流も注入されるため、スピン流誘起現象を精度良く測定することはできなかった。スピン偏極SPM等によるスピン注入も、純スピン流でないためにスピン物性測定においては十分ではなかった。

今後のスピントロニクスやスピン物性測定の発展には、任意の場所で、電荷電流を伴わないスピン流注入を行うことができるプローブが求められていた。

### 2. 研究の目的

本研究は、その場で純スピン流を注入できる新奇なプローブの実現可能性を探るものである。

具体的にはプローブ内に強磁性-常磁性接合を作り、スピン流生成に必要となる電流を回収する一方、界面からスピン拡散長未満の距離にプローブ先端を配置することで、純スピン流のみを注入・検出できる従来にないSPMプローブを提案する(図1)。

その実現可能性を検討、および実際にプローブを試作し、その場での純スピン注入を検証することを目的とする。

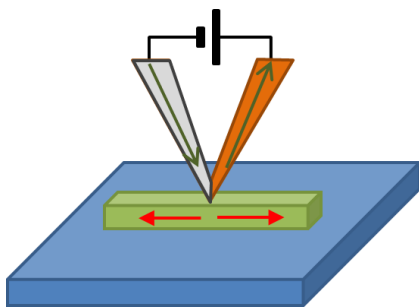


図1. 提案した純スピン流注入プローブ

### 3. 研究の方法

純スピン注入プローブの実現可能性を示すために、まず筆者らが従来から使用している独立駆動型四探針STMにおいて、強磁性探針と常磁性探針を接触させることで、純スピン流注入プローブとし、純スピン流注入を検証する。

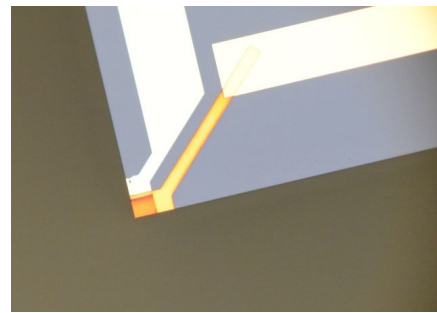
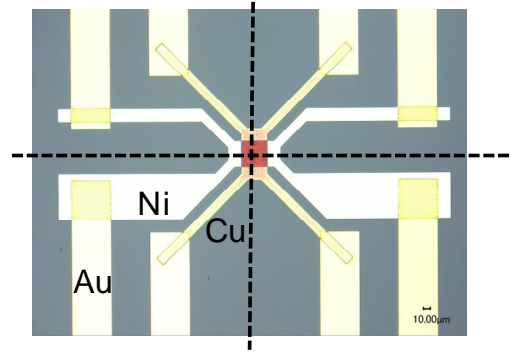


図2. 作成した純スピン注入プローブパターン全体(上)及び切断後の先端(下)。Si基板上にパターンを作成し、強磁性体・常磁性体界面で4分割することでプローブ先端を形成する。

その後、汎用性を高めるため、モノリシックな純スピン流注入プローブの製作へ向けての検証を行う。

### 4. 研究成果

まず、独立駆動型四探針STMにおいて、強磁性探針と常磁性探針を接触させることによるスピン注入手法の定量的な検証を行った。しかし、この手法では探針の位置決め精度、特に温度ドリフトにより十分な精度で測定を行えないことが判明した。強磁性・常磁性界面を利用するとスピン注入ができることは先行研究で判明しているが、それを十分な精度でスピン注入プローブに適用するためには、安定した強磁性体・常磁性体界面が必要であり、モノリシックプローブの必要があることが分かった。

モノリシックプローブの必要性を確認したため、次に、モノリシックプローブの実現可能性の検討、および試作を行った。スピン圧は生成された位置からスピン拡散長程度で消滅するため、スピンを生成する強磁性体・常磁性体接合と、スピンを試料に注入するプローブの先端との距離はスピン拡散長未満にする必要がある。スピン拡散長は最も長い物質を使っても1μm程度とごく短い。プローブ先端に界面を作るのは通常は困難であるが、本研究では界面をプローブ厚み方向にとり、接合部分を切断することでプローブ先端を形成することで解決した(図2上)。

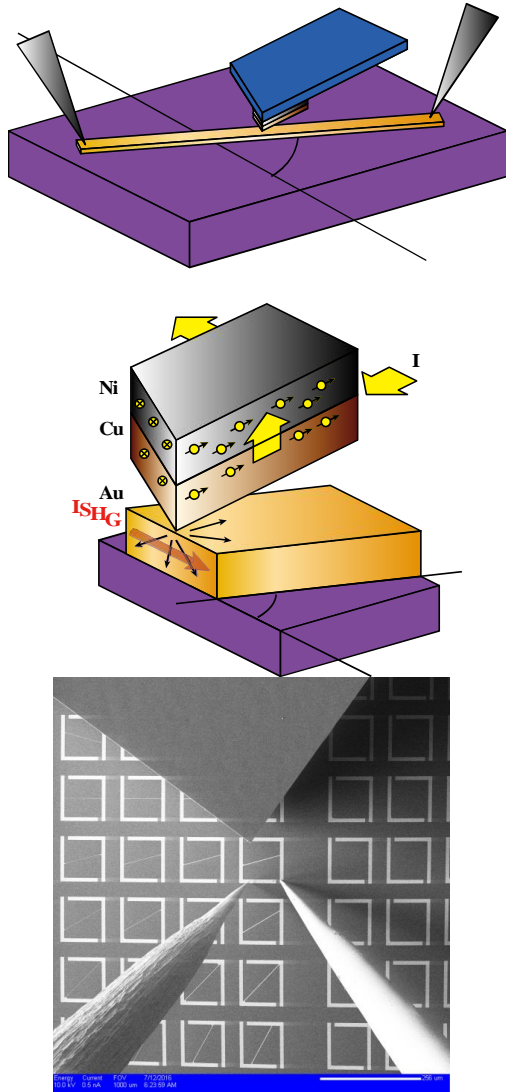


図3. 作成した純スピン注入プローブによる逆スピンホール効果の測定の模式図(上)とその拡大図(中)、実際の測定時のSEM像(下)

プローブ製作は東京大学大規模集積システム設計教育研究センター(VDEC)の所有するクリーンルームにおいて、同センターの保有する微細加工装置を用いた。磁性体金属として100nm厚のNiもしくはパーマロイ、常磁性体金属として100nmのCuを用い、先端の強磁性体・常磁性体接合は10 $\mu$ m四方とした。プローブ内ループの全抵抗は約20  $\Omega$ であった。

試作したプローブのスピン注入の評価を行うため、逆スピンホール効果を用いた純スピン流注入の実証を行った。微細加工技術によってさまざまな角度の金ワイヤーを作成し、そのワイヤーに純スピン注入プローブを接触させ、プローブのスピン生成ループに電流を流した際、ワイヤー両端に生じる逆スピンホール電圧を測定することで純スピン注

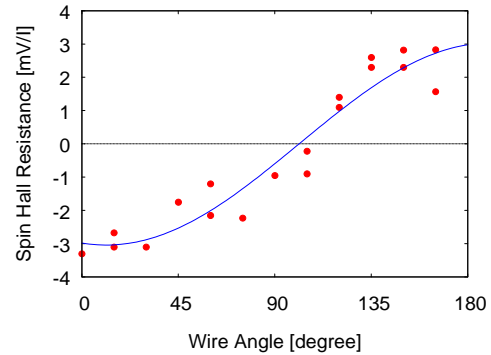


図4. 測定された逆スピンホール抵抗と金ワイヤー角度。スピンの向きと垂直な方向に電圧が発生するため、スピンホール抵抗は金ワイヤーの角度に対してsin関数の形状となる。純スピン注入プローブのスピンの向きはスピンホール抵抗が0となる方向となる。

入を検証した。ここで、プローブのスピン生成ループと金ワイヤーは電氣的に接触しているが、同電位となっており、電流は流れていない。この時発生した電圧は最大でおおよそ3mV/Iであり、過去の逆スピンホール効果の研究成果と一致し、純スピン流が注入されていることが確認されたと考えている。

金ワイヤーに電圧をかけた際にプローブに生成する電流を測定することでスピン圧を検出するという、逆効果を用いたスピン圧検出はできなかった。これは作成したプローブのスピン生成・検出機構である磁性体・常磁性体界面が広く、スピン緩和長よりも遠い距離まで広がっているため、スピン注入・検出に有効に使われていない領域があるためであることがわかった。

当初計画では、モノリシックなプローブ作成のために各種検討を行うところまでの研究計画であったが、実際のプローブ製作・その実証まで研究を進めることができた。本研究によって開発されたプローブは、従来不可能であった「その場」での「空間分解能を持った」「純スピン注入」を実現するプローブである。微細加工技術を用いた電極の埋め込みやマイクロ波照射装置が必要ない、簡便な測定手法であるだけでなく、スピン物性の空間依存などの従来不可能であった測定が可能であり、スピン物性研究・表面物性研究における新たな測定手法になると考えている。

#### 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)

[学会発表](計2件)

保原 麗, 秋山 了太, 長谷川 修司, 純スピン流生成プローブの開発, 日本物理学会

2016年秋季大会, 2016年9月13日, 金沢大学(石川県 金沢市)

保原 麗, 秋山 了太, 長谷川 修司, 純スピン流注入プローブの開発, 第64回応用物理学会春季学術講演会, 2017年3月14日, パシフィコ横浜(神奈川県 横浜市)

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: プローブおよびその製造方法

発明者: 保原 麗

権利者: 東京大学

種類: 特許

番号: 特許願 2016-167903

出願年月日: 2016年8月30日

国内外の別: 国内

〔その他〕

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

保原 麗 (HOBARA REI)

東京大学・大学院理学系研究科 特任研究員

研究者番号: 30568176

### (2) 研究分担者

長谷川 修司 (HASEGAWA SHUJI)

東京大学・大学院理学系研究科 教授

研究者番号: 00228446

### (3) 連携研究者

平原徹 (HIRAHARA TORU)

東京工業大学・理工学研究科 准教授

研究者番号: 30451818