



マイクロ波を用いた熱スピン注入技術の開発 —ワイヤレス・スピンドバイスの実現に期待—

九州大学大学院理学研究院／量子ナノスピン物性研究センターの山野井一人博士、木村崇教授らの研究グループは、マイクロ波を用いて、ワイヤレスで選択的にスピン流を生成する技術の開発に成功しました。

エレクトロニクスデバイスの更なる高性能化・高機能化の観点から、スピン角運動量（※1）の流れであるスピン流を用いたデバイスが注目されています。電子は、自転に似た性質によるスピンと呼ばれる物理量を持っていて、電子が流れると、電気の流れに対応する電流と同時に、スピン角運動量の流れに対応するスピン流が起こります。このスピン流をうまく制御することが、スピンドバイスを動作させるうえで最も重要な課題となります。同グループはこれまでに、CoFe系の合金を用いると、熱により巨大なスピン流を生成できることを報告していました。そこで今回、同物質にマイクロ波を照射することでスピンの集団運動を共鳴的に励起して、強磁性金属を効果的、且つ選択的に発熱させることで、高効率なスピン流生成を実現しました。

強磁性金属の共鳴周波数は、材料や形状、外部磁場で調整可能なため、特定の周波数のマイクロ波を用いれば、選択的な加熱が可能になります。また、マイクロ波は空間を伝搬するため、配線の必要性がなく、更に、空間には使われていない膨大なマイクロ波が存在していることから、本素子を空間に置くことで未利用なマイクロ波を回収して動作するスピンドバイスなどへ応用が期待されます。

本研究は、文部科学省・新学術領域創成型研究「ナノスピン変換科学」、科学研究費補助金・基盤研究(S)（課題番号：25220605）、キャノン財団の支援を受けました。本研究成果は、米国物理学雑誌「Physical Review Applied」誌のオンライン版に2017年11月15日（水）に掲載されました。

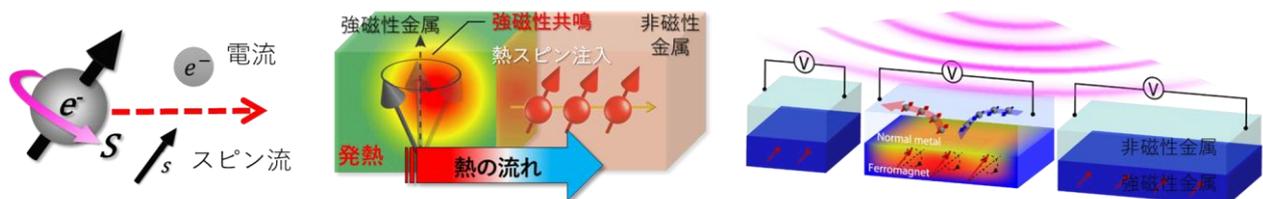


図1. 強磁性共鳴発熱効果による熱スピン注入と選択的ワイヤレス・スピン注入技術の概念図

研究者からひとこと：

本実験は、構造が極めて単純なため作製も容易です。この技術を用いれば、体内や人が直接アクセスできない場所等にマイクロ波を使って無線での電力の供給が可能になるため、様々な応用が期待できます。

【お問い合わせ】大学院理学研究院 物理学部門 / 量子ナノスピン物性研究センター
教授 木村 崇(きむら たかし)・山野井 一人(やまのい かずと)
電話:092-802-4083 FAX:092-802-4107 Mail: t-kimu@phys.kyushu-u.ac.jp

【研究の背景】

エレクトロニクスデバイスの更なる高性能化・高機能化の観点から、スピン角運動量（※1）の流れであるスピン流を用いたデバイスが注目されています。スピン流を用いることで、情報の担い手を電荷からスピンに替え、不揮発性（※2）やジュール熱の最小限化など、消費電力の大幅な低減が期待できると共に、スピンの方向自由度を用いた多彩な特性をデバイスに付加させることができます。このようなスピndeバイスをエネルギー効率良く動作させるには、如何にして効率的にスピン流を作り出すかが最重要な課題となります。スピン流を生成するには、強磁性金属に電圧を加える電氣的な方法が一般的ですが、本研究グループでは、CoFe系の合金に熱を加えることで、非常に効率的にスピン流が生成できることを実証していました。しかしながら、実際のデバイス構造において、どのようにして強磁性金属を加熱するかというのが一つの課題になっていました。一方で、同グループは、強磁性金属の共鳴特性（※3）を調べる研究も行っており、その研究において、強磁性金属は共鳴時に強く発熱されることを見出しました。そこで、同グループは、前述の熱スピン注入技術における強磁性金属の加熱法として、このマイクロ波励起による強磁性共鳴発熱効果を用いれば、ワイヤレスで、且つ選択的にスピン流が生成可能になると着想しました。

【研究手法と成果】

今回、研究グループは、図1に示すように、絶縁性のSi基板上に、白金と強磁性金属CoFeBの二層構造を作製しました。この構造にマイクロ波を照射して強磁性共鳴を励起することで強磁性体を加熱し、その熱を駆動力として、白金にスピン注入を行いました。熱スピン注入により生成されたスピン流は、白金中で発生する逆スピンホール効果（※4）により電圧に変換されます。その電圧の強度から、生成されたスピン流の大きさを評価しました。

図2(a)は、周波数6GHzのマイクロ波を照射した際に、白金の両端に発生した電圧の外部磁場依存性です。外部磁場の条件が強磁性共鳴の条件に一致した時、大きな電圧が発生しており、強磁性共鳴時にスピン流が生成しているのが確認できます。ここで、強磁性共鳴によってスピン流が生成されるメカニズムとしては、今回の発熱効果による熱スピン注入の他に、スピンプンピング（※5）という別の現象が以前から知られており、今回生成されたスピン流の主要メカニズムがどちらのメカニズムで発生したかを区別する必要があります。そこで、研究グループは、基板/白金/強磁性金属の積層順序を持つ試料（試料A）に加えて、基板/強磁性金属/白金の順序の試料（試料B）も準備して、発生するスピン流の大きさを比較しました。ここで、スピンプンピングの場合、理想的にはどちらの構造でも、同じ強度のスピン流が発生するのに対して、今回の熱スピン注入型の場合は、強磁性金属から発生した熱が白金側に流れる量が重要なので、試料Aの方が大きなスピン流が発生すると期待されます。図2(b)は、試料Bで同一の実験を行った場合に観測された電圧の外部磁場依存性です。図2(a)と比べて信号の大きさが減少しているのは明瞭であり、本実験におけるスピン流生成メカニズムは、熱スピン注入であることが分かりました。

【今後の期待】

強磁性金属の共鳴周波数は形状などで調整できるため、空間に特定の周波数のマイクロ波を伝搬させることで、ワイヤレスで選択的にスピン流の生成が可能となる。また、近年の無線通信技術の発達により、空間には使われていない膨大なマイクロ波エネルギーが存在しており、それらを電気エネルギーに変換する技術になる。

本研究は、文部科学省・新学術領域創成型研究「ナノスピン変換科学」、科学研究費補助金・基盤研究(S)（課題番号：25220605）、キャノン財団の支援のもとに行われました。

【参考図】

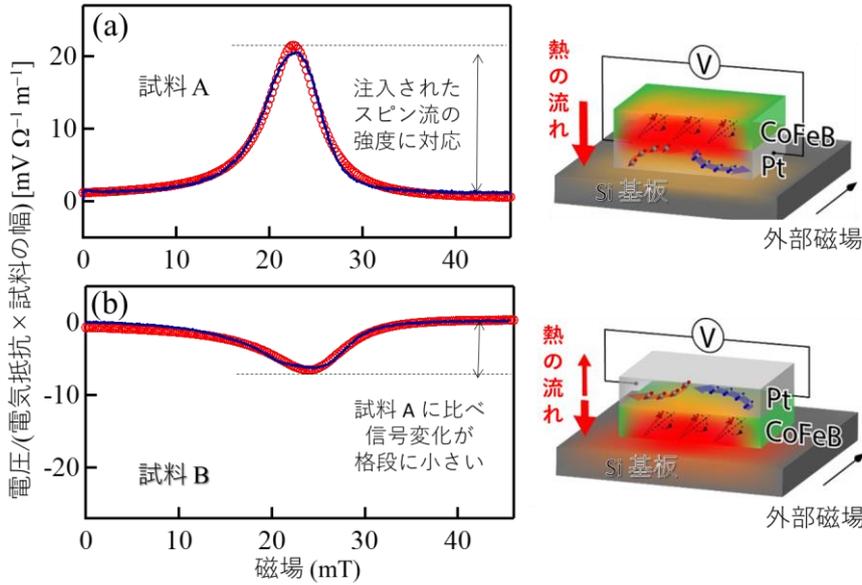


図2. 6GHz のマイクロ波照射により、白金 (Pt) 両端に発生するスピンホール電圧の磁場依存性。発生電圧は、熱スピン注入により白金中に生成されるスピン流の強度に対応している。試料 A では、発生した熱が効果的に白金側に流れるが、試料 B では熱が基板側に逃げるため、白金側に流入する熱は小さくなる。その結果、観測されるスピン流は小さくなる。

【用語解説】

(※1) スピン角運動量

電子が持つ角運動量の1つ。上向きと下向きの2つの状態が存在し、角運動量の起源が電子の自転運動として説明できるため、スピンと呼ばれる。

(※2) 不揮発性

エネルギーの供給が無くても情報が保持される特性を示しており、この場合、磁石の向きがエネルギーの供給が無くても、保持されることを指している。

(※3) 強磁性金属の共鳴特性

強磁性金属に、スピンの回転運動周波数と同じ周波数のマイクロ波磁界を外部から加えることで、振幅が大きいスピンの回転運動が励起されること。

(※4) スピンホール効果

スピン軌道相互作用が存在すると、電子の進行方向はスピンの方向に応じて曲げられる。これによりスピン流は電流に、電流はスピン流に変換される。この現象をスピンホール効果と呼んでいる。

(※5) スピンポンピング

磁化の高速共鳴運動によって強磁性金属内に溜まった非平衡スピンの非磁性金属に流れだすことで、スピン緩和が生じる現象