

戦略的国際科学技術協力推進事業

日本－ドイツ研究交流

研究課題

「面内スピン角運動量移行素子におけるブリュアン光散乱法によるスピン蓄積空間分布の観測」

研究終了報告書

研究交流期間 平成 19年 4月～平成 22年 3月

研究代表者：大谷 義近
(東京大学物性研究所、教授)

1. 研究・交流の目的

プレーナースピン伝播素子における非局所スピン注入を用いることで、電荷の流れが無いに関わらず、スピン角運動量の流れ(スピン流)が存在する系が実現できる。これは純粋なスピン流であるため、スピントランスファー効果を理解・研究する上で極めて有効である。本研究では、日本側研究グループは得意とする高度な微細加工技術によりプレーナースピン伝播素子作製し、提供する。ドイツ側研究グループは、得意とする光学測定手法を素子に適用して、非接触にスピン蓄積やスピン流分布の空間マッピングを行う技術を確認することを目指す。この技術が確立されれば、プレーナークonstruktionにおける電流を伴わないスピン流の研究に高い注目が集まることは言うまでも無く、さらに、電荷を伴わない情報伝送技術や金属スピンホール効果の実験的研究の発展等、様々な新しい成果が期待できる。

2. 研究・交流の方法

本プロジェクト開始時における主な研究課題は以下の通りであった。

1. 空間分解スピン偏極率観測用ブリルアン光散乱(BLS)顕微鏡の開発
2. 非磁性金属内のスピン蓄積の空間分布の特性評価とスピン流の空間閉じ込め効果
3. 高いスピン軌道相互作用を有する物質からのスピンホール効果によるスピン注入の探索

具体的に説明すると、

課題1は、本プロジェクトの中でも重要な部分を占め、ドイツのグループは、本プロジェクト開始と共に、新しい BLS 顕微鏡のための特殊ステージを設計・構築し、既存の BLS 装置に組み込んだ。また、素子に数 10 GHz の高周波電気信号を流すための特殊試料ホルダーの設計も行い。課題1は計画通り確立され、残り2つの課題へと研究を進めた。

課題2では、まず最初に、Al や Cu などのスピン拡散長の長い 3d 非磁性金属のスピン蓄積の空間マッピングを行い、スピン蓄積の閉じ込め効果の検証実験を試みた。申請者らのこれまでの研究により、強磁性体に励起されるスピン波は、明確な量子化モードが存在する。同様の量子化モードが非磁性体中のスピン流の閉じ込めによっても生じるかを確認する。素子構造は図1に示すように強磁性細線に複数の小さな非磁性電極を取り付けただけのかなり単純なものである。スピンポンピングにより、それぞれの非磁性端子にスピン蓄積を誘起し、スピン蓄積の空間分布を生じさせる。BLS 顕微鏡によりマッピングする。これらの実験は、素子の最適化(素子構造、物質、膜厚、表面、界面特性など)と平行しながら行った。しかしながら、面内配置の素子構造では強磁性細線からの信号が測定する BLS 信号に混入することが本研究プロジェクトから明らかとなったために、図2に示すようなウエッジ構造を有する素子を用いて膜厚方向へのスピン注入法を利用する実験を行った。

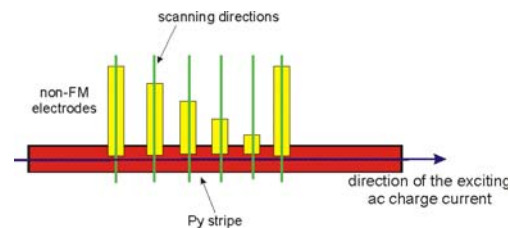


図1 複数端子を有する面内スピン注入素子構造

課題3では、現在注目されているスピンホール効果に関連している。スピンホール効果とは、非磁性体に電流を流すことで、スピン軌道相互作用による散乱により、電流に対して垂直方向にスピン流が発生する現象である。この現象は、強磁性体を使わない新しいスピン流の発生手段として、近年、非常に注目されている。この課題では、このスピンホール効果によりスピン流を発生させ BLS 顕微鏡により観測することを目指す。具体的な素子構造は、図1と同様であり、強磁性細線の部分をスピン軌道相互作用の大きい物質（例えば Pt）に置き換え、同様の実験を行う計画であったが、課題2と同様の問題が生じることが予想

されたため、準備実験である伝導実験と物質探索に重きを置いて研究を遂行した。

3. 研究・交流実施体制

3. 1 日本側

氏名	所属	役職	学位	役割
大谷 義近	東京大学物性研究所	教授	博士（理学）	統括
木村 崇	東京大学物性研究所	助教 (H21九大に転出)	博士（工学）	素子作製 伝導測定
大西 紘平	東京大学物性研究所	大学院生		伝導測定
関口 康爾	理研・基幹研	研究員 (H21京大に転出)	博士（理学）	伝導測定
福岡 康裕	理研・基幹研	副チームリーダー	博士（工学）	素子作製 伝導測定
新見 康洋	東京大学物性研究所	助教	博士（理学）	伝導測定

3. 2 相手国側

氏名	所属	役職	学位	役割
Burkard Hillebrands	TU Kaiserslautern	教授	Ph.D	統括
Jaroslav Hamrle	TU Kaiserslautern	博士研究員	Ph.D	BLS 光学
Helmut Schultheiß	TU Kaiserslautern	大学院生		BLS 分光
Frederik Fohr	TU Kaiserslautern	大学院生	H23 博士学位取得	BLS 分光
Dieter Weller	TU Kaiserslautern	技術職員		高周波測定

4. 研究成果

4. 1 研究成果の自己評価

- ☒ 計画以上の成果がでた ☐ 計画通りの成果がでた
☐ 計画とは異なるが有益な成果がでた ☐ 計画ほどの成果はでなかった
☐ いずれでもない

4. 2 研究成果の自己評価の根拠

<日本側成果>

本研究プロジェクトを通じて、スピン流の効率的な生成方法に関する深い知見が得られた。

1. 低抵抗 MgO 界面層を利用することで、強磁性体から非磁性体中への高効率なスピン注入技術を確認した。
2. ナノサイズ非磁性体中のスピン緩和現象を詳細に評価する手法を確認すると共に、銀細線において数 μm 以上の長距離スピン輸送技術を確認した。
3. イリジウムを添加した銅において、スキュー散乱に起因したスピンホール効果を観測し、

白金等の貴金属よりも大きなスピホール角を示すことを明らかにした。

<ドイツ側成果>

高い空間分解能を有する BLS 顕微鏡を開発した。

<共同研究成果>

高周波を強磁性体に印加することで磁化の歳差運動を誘起し、その歳差運動の緩和過程で生成されるスピン流を非磁性体中に注入し(スピンプンピング法)、非磁性体中に生成されるスピン蓄積を BLS 顕微鏡により検出した(図 2)。強磁性体と非磁性体間の MgO 有無試料間の信号相対強度を比較することで、非磁性体(銅、銀、白金)中のスピン緩和を議論した。横緩和時間は、強磁性体・非磁性体間界面に強く影響されることを明らかにした。

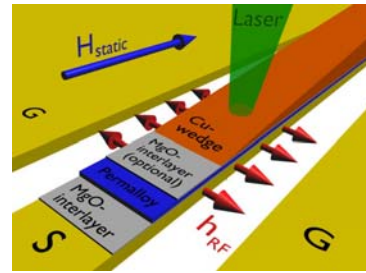


図2 BLS 顕微鏡によるスピン流検出実験の概念図

以上、本共同研究は純スピン流の生成・輸送・検出に関して多くの新しい知見を与えると共に技術開発にも成功した。MgO 層を利用した高効率スピン注入技術は、従来と比較し非磁性体中のスピン蓄積量を 100 倍も増大させた。これは、面内スピン角運動量移行素子の高空間分解能磁気センサ応用研究を加速させると共に、スピン蓄積を利用した新しい物性研究への展開を切り開くものである。また、BLS 顕微鏡は、高周波磁気デバイスやマグノンの生成・緩和過程を調べるのに非常に有用である。新しい BLS 顕微鏡は、高い空間分解能と検出感度を有しており、本研究の大きな成果である「光学的手法による世界初の非磁性体金属中のスピン検出」を可能にした。多くの試行錯誤を繰り返し、日本側の高い素子作製技術とドイツ側の高い測定技術を活用することで得られたものである。この成果は、非磁性体中のスピン緩和に新しい知見を与えただけでなく、スピン流とスピン波を利用した新しいスピントロニクス研究の展開を導くことが期待される。

4. 3 研究成果の補足

特になし。

5. 交流成果

5. 1 交流成果の自己評価

- 計画以上の交流成果がでた □ 計画通りの交流成果がでた
□ 計画ほどの交流が行われなかったが成果はでた
□ 計画ほど交流成果がでなかった
□ いずれでもない

5. 2 交流成果の自己評価の根拠

日本側が試料を作製しドイツ側が測定を行うという分業的な側面があるが、本研究では高い研究目標の達成を目指して研究交流を密に行った。例えば、新しい構造の試料測定においては常に日本側若手研究者をドイツ側へと派遣し、作製側と測定側からの視点を共有することで迅速に問題解決を行った。ドイツ側の博士課程学生も日本に滞在し、試料作製に

従事した。これにより、互いの技術と知識を理解・共有することで様々な新しいアイデアが生まれた。本共同研究に主に従事したドイツ側大学院生は今年3月に博士学位を取得して卒業したが（日本側研究代表者はその博士号学位審査会に副査として参加）、新しい博士課程学生が共同研究に従事しており、相手国との交流は現在も継続している。

平成21年度は日本、平成22年度はドイツにて本プロジェクト主催のワークショップを開催した。最終年度のワークショップは「spin wave aspects in spintronics」という主題で、日本とドイツを中心に6カ国から50名程度の参加者が集まった。本研究で得られた成果について活発な議論が行われ、本研究分野の注目度の大きさを再認識した。

5. 3 交流成果の補足

特になし。

6. 主な論文発表・特許出願

論文 or 特許	・論文の場合： 著者名、タイトル、掲載誌名、巻、号、ページ、発行年 ・特許の場合： 知的財産権の種類、発明等の名称、出願国、出願日、 出願番号、出願人、発明者等	特記 事項
論文	F. Fohr, Y. Fukuma, S. kaltenborn, L. Wang, J. Hamrle, H. Schultheib, A. A. Serga, H. S. Schneider, Y. Otani, B. Hillebrands. “Optical detection of spin transport in non-magnetic metals” to be published in Physical Review Letters (arXiv:1011.4656).	
論文	Y. Niimi, M. Morota, D. H. Wei, C. Deranlot, M. Basletic, A. Hamzic, A. Fert, Y. Otani. “Extrinsic spin Hall effect induced by Iridium impurities in Copper” Physical Review Letters, 106 , 126601 (2011).	
論文	Y. Fukuma, L. Wang, H. Idzuchi, S. Takahashi, S. Maekawa, Y. Otani. “Giant enhancement of spin accumulation and long-distance spin manipulation in metallic lateral spin valves” Submitted to Nature Materials (arXiv:1103.0852).	