

京都大学	博士（工学）	氏名	重松 英
論文題目	Study on transport and conversion of ac and dc spin current generated by magnetization dynamics (磁化ダイナミクスにより誘起される交流・直流スピン流の輸送・変換に関する研究)		
（論文内容の要旨） 本論文は、固体物質中のスピン流物性を探索する手法として動力的スピン注入法に着目し、半導体を中心とした物質中の交流・直流スピン流の生成ならびに検出実験を行った結果をまとめたものである。 第一章は序論であり、スピントロニクスやスピン流についての背景知識と、本論文の研究に繋がる既存の実験・観測技術の進展について述べている。 第二章では、近年スピン注入源として注目されているイットリウム・鉄・ガーネット (YIG) のスピン注入効率の温度依存性に関する研究が述べられている。YIG を用いた系での直流スピンプンピング法では、低い磁化ダンピングによって高いスピン注入効率を実現でき、かつ YIG 自身が絶縁体であるために金属磁性体で問題となっていた磁気整流効果の重畳が排除できる。この研究ではこの実験系を半導体等の広範な固体材料に適用することを見据えて、YIG のスピン注入効率の温度依存性を検証した。温度可変装置を備えた電子スピン共鳴装置に Pt/YIG 二層膜構造試料を設置して直流スピンプンピングによる検出起電力を常温から 80 K にわたって測定したところ温度低下に従うようなスピン注入効率の低下が見られた。YIG の強磁性共鳴スペクトルの半値幅の温度低下に伴う増大も観測され、磁化ダンピングの低温域における増大がスピン注入効率の低減の主因であることがわかった。さらに、共鳴周波数を変化させた実験から、磁化ダンピングの温度依存性が YIG の希土類不純物による Slow Relaxation 機構に従うことを明らかにした。 第三章では、YIG/半導体界面の形成法として、半導体カーボンナノチューブを YIG 基板上に滴下することを試み、スピン注入実験を行った結果が述べられている。実験ではイオン液体によるゲート構造により半導体カーボンナノチューブにキャリアを誘起させ、直流スピンプンピング法によるスピン注入下におけるスピン流電流変換起電力の観測を試みた。観測された起電力はキャリア変調と磁化方向の双方により反転を示した。一方で、近年 YIG 表面のスピン波励起による熱輸送効果が報告されているため、その効果による信号の重畳を検討するために直流スピンプンピング実験におけるゼーベック起電力の重畳を検証すべく熱電対を用いた実験を行ったところ、金属カーボンナノチューブへのスピン注入実験により得られた起電力が、YIG 基板上の熱勾配からゼーベック起電力により推定される熱起電力と同等であることがわかった。これにより、高ゼーベック係数材料に直流スピンプンピング法を適用する際の問題点を明らかにした。 第四章では、熱電対を用いた YIG 上のスピン波による熱輸送効果による効果の測定について詳述し、そのメカニズムをマイクロマグネティック計算により議論した結果が述べられている。この熱輸送効果を引き起こすスピン波 (Damon-Eshbach モード、DEM) は磁性薄膜表裏で伝搬方向が対合するため、正味としての熱勾配を得るためには磁性薄膜の表裏で励起されるスピン波の強度に差をつけることが必要であるが、この章の実験では直流スピンプンピング法にも用いられる ESR キャビティにおいて、一様なマイクロ波分布下で DEM による熱輸送効果を検証した。YIG 薄膜上に SiO₂ のスピン流阻止層、Cu と Sb からなる薄膜型熱電対を設置し、直流スピンプンピング法の設定におい			

京都大学	博士（工学）	氏名	重松 英
て熱起電力測定を行った。得られた熱起電力信号は、一様なマイクロ波励起においても YIG 薄膜表面側のスピン波強度が裏面側よりも優勢であり熱輸送効果が発現していることを示唆した。この起源について YIG 薄膜裏面が GGG 基板と接していることによる磁化ダンピングの増大にあると考え、この状況をマクロマグネティック計算モデル上で再現し、一様な交流磁場による励起においても DEM の強度が表裏面で異なることが確認された。これら結果により、ESR キャビティによる一様なマイクロ波分布においても試料構造上の対称性の破れにより DEM による熱輸送効果が誘起されることがわかった。 第五章では、先述の直流スピンプンピング法の問題点を踏まえ、交流スピン流生成検出法を用いた半導体中のスピン緩和の検討について述べられている。交流スピン流生成検出法は米 NIST のグループにより 2018 年に提唱され、同グループでは Pt や Cu への交流スピン流注入ならびにスピン流電流変換の検出に成功している。この手法では非磁性体/磁性体二層構造をコプレーナ導波路に近接させ、磁性体の強磁性共鳴を誘起させた際のインダクタンス応答を解析することでスピン軌道トルク伝導度と呼ばれるスピン流電流変換効率を求めることができる。この章では Si のドーブ元素とドーピング濃度を系統的に幅広く変化させた $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Si}$ 構造を用いて先述の手法を適用した。測定により得られたスピン軌道トルク伝導度はドーブ元素とドーピング濃度に対して依存性を持ち、スピン流電流変換のドーピングによる変調を強く示唆する結果を得、Si バルクあるいは Si/Cu 界面におけるスピン流電流変換の起源として、逆スピンホール効果や逆 Rashba-Edelstein 効果の寄与を議論した。この結果により、Si におけるスピン流電流変換物性を新たな視点で明らかにすることができ、さらに交流スピン流生成検出法が半導体などの広範な固体物質に適用可能であることが示された。 第六章では、スピン流物性のうちスピン流輸送物性に着目し、半導体 3C-SiC を、スピン流チャネルの候補となり得る新規材料としてスピン流輸送実験を行った。一般に原子番号の小さい元素は結晶場が小さくスピン軌道相互作用が小さいと期待される。一方、結晶反転対称性を欠く系では Dresselhaus 型スピン軌道相互作用が発現しスピンコヒーレンスが低減する。ここで 3C 晶系の SiC に着目すると、軽元素で構成されているが閃亜鉛鉱型構造を持っているため、軽元素性と結晶反転対称性のいずれが強くスピン緩和に働くか、大きな興味を持たれる。そこで、このような系のスピン緩和物性の理解に向けて、直流スピンプンピング法を用いた横型スピン流輸送素子による SiC 中のスピン輸送実験を行った。n 型 3C-SiC チャネル上に強磁性金属と非磁性金属を平行に配置した素子において、注入されたスピン流がチャネル輸送を経て非磁性体金属中でスピンホール起電力として観測された。実験は室温で行われ、輸送長は $1.2 \mu\text{m}$ であった。この成果は 3C-SiC がスピントロニクス素子のチャネル材料としての有望性を示すものである。 第七章では、以上の研究結果をまとめた上で、将来における研究の進展について展望を述べている。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、固体中のスピン流の輸送現象・スピン流電流変換現象に焦点を置き、種々の固体物質中に交流・直流スピン流を生成させる実験を行った結果をまとめている。その過程でスピン流物性の評価法の確立に向けた学理的・技術的に優れた知見が得られた。主な成果を以下に示す。

- ・Pt/YIG 二層構造における直流スピンプンピング法でのスピン注入効率の温度依存性を常温から 80 K の領域で明らかにした。さらに詳細な実験から、YIG 中の希土類不純物による Slow Relaxation 機構が低温域で磁化ダンピングを増大させ、スピン注入効率の低減に繋がっていることが示唆された。

- ・ YIG 表面のスピン波による熱輸送効果を、薄膜型熱電対構造を用いて一様マイクロ波分布下で観測した。マイクロマグネティック計算により、磁化ダンピングに関する対称性の破れによっても同効果が発現することを明らかにした。

- ・ 直流スピンプンピング法における問題点を回避するため、交流スピン流生成検出法を半導体 Si に適用した。ドーパ元素やドーピング濃度に依存したスピン流電流変換効率の変調が見られ、そのメカニズムについて逆スピンホール効果・逆 Rashba-Edelstein 効果に基づいて議論した。

- ・ n 型 3C-SiC をチャネルとしたスピン輸送デバイスを作製し、常温における $1.2 \mu\text{m}$ のスピン輸送を示す信号が得られた。

本論文は、申請者の研究が世界的に当該研究分野において優れた内容と先進性を有しており、また申請者が本研究に関する十分な物理的知見を深い理解を有しており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和元年 12 月 16 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断した。このため、公表に際しては当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。