

氏名(本籍)	おおとりひろゆき 大鳥博之(大阪府)			
学位の種類	博士(工学)			
学位記番号	博甲第6394号			
学位授与年月日	平成25年3月25日			
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当			
審査研究科	数理物質科学研究科			
学位論文題目	超伝導探針を用いた強磁性体スピン分極率測定に関する理論的研究			
主査	筑波大学教授	博士(理学)	湯浅新治	
副査	筑波大学教授	工学博士	喜多英治	
副査	筑波大学教授	博士(工学)	大野裕三	
副査	筑波大学准教授	博士(理学)	小林伸彦	
副査	産業技術総合研究所チーム長	博士(理学)	今村裕志	

論文の内容の要旨

強磁性材料を特徴づける重要な物質パラメータの一つにスピン分極率がある。磁気抵抗素子や不揮発性磁気メモリなどのスピントロニクス・デバイスの高性能化のためには、より高いスピン分極率を持つ強磁性材料の開発が急務であり、そのような材料の探索を効率的に行うためには、簡便で正確なスピン分極率測定手法の開発が必要である。近年、簡便なスピン分極率測定法として、Andreev 反射と呼ばれる現象を用いた Point-contact-Andreev-reflection (PCAR) 法が開発され注目を集めている。PCAR 法は強磁性体表面に超伝導体の針を接触させて Andreev 反射を測定するだけでスピン分極率を見積もることが出来る非常に簡便な手法であるが、測定の際に超伝導探針によって強磁性体の表面が破壊されるという欠点を有している。本博士論文では従来型の PCAR 法の欠点を克服する測定法の理論提案を目指して研究を行い、強磁性/非磁性/超伝導接合系、及び強磁性/真空/超伝導接合系における Andreev 反射の理論・シミュレーション解析に基づく以下の結果が示されている。

- (1) 非磁性金属薄膜を保護膜として用いた PCAR 測定の解析：PCAR 法の改良手法として金などの非磁性体で強磁性体表面を覆い保護した系、即ち強磁性/非磁性/超伝導接合系について非磁性体の保護膜が測定に与える影響を調べた。その結果、非磁性層が数ナノメートル程度の場合には、強磁性/超伝導接合系とほぼ同じコンダクタンスの値が得られた。これにより、非磁性層が数ナノメートル程度の場合には従来の PCAR 法と同様の解析手法が適用可能であることを示した。
- (2) 非磁性金属膜内の多重反射を用いた新しいスピン分極率測定手法の理論提案：非磁性金属膜の膜厚が数マイクロメートルの場合には、コンダクタンスのバイアス電圧依存性に強磁性体のスピン分極率の大きさに依存した周期の振動が現れる事を示した。さらに振動周期の解析解を導出し、振動周期とスピン分極率の関係を明らかにした。これにより、非磁性金属膜内の多重反射を用いた新しいスピン分極率測定手法の理論提案を行った。
- (3) 真空を介した Andreev 反射の解析を可能にする新規数値シミュレーション手法の開発：従来型の PCAR 法には、超伝導探針が試料に接触する際に試料の表面を破壊してしまうという欠点があった。そこで、

非接触型の PCAR 法の開発を目指し、走査型トンネル顕微鏡の解析で用いられるリカージョン転送行列法を拡張し、超伝導体と任意の形状のトンネルバリアを扱う事が可能な新規シミュレーション手法の開発を行った。

- (4) 高温超伝導体を探針に用いた PCAR 法の理論提案：従来の PCAR 法では探針に s 波超伝導体を用いるため極低温で測定を行う必要があった。この点は探針に高温超伝導体を用いることで緩和されると考えられるが、そのためには従来型の PCAR 法の理論を拡張し、高温超伝導体の特徴である超伝導ギャップの異方性を取り入れた理論を構築する必要がある。そこで探針に高温超伝導体を用いた強磁性 / 高温超伝導接合系について基礎理論の構築と理論・シミュレーション解析を行った。その結果、拡張 s 波超伝導体と d 波超伝導体のどちらの場合でもゼロバイアス・コンダクタンスの値から強磁性体のスピン分極率の決定が可能である事を示した。さらに、d 波超伝導体の場合にはコンダクタンスのバイアス依存性からもスピン分極率が決定可能である事を明らかにした。

本研究は解析的な手法を用いることで観測される物理現象において何が重要であるかを明示すると共に、数値シミュレーションを併用することで実験との定量的な比較が可能となっている。本研究で示された解析手法は極めて簡潔であり、多くの研究者に共有され得るものである。また本研究で得られた成果はスピントロニクス・デバイスの高性能化に向けた材料開発において重要な役割を果たすものである。

審査の結果の要旨

大鳥氏の博士論文では、超伝導体と強磁性体との接合で生じる Andreev 反射を用いた強磁性体のスピン分極率測定法 (PCAR 法) に関して、解析計算および数値シミュレーションの手法を駆使し、従来型の測定手法における欠点を克服した新規測定手法の理論提案を行っている。第 1 章は序論である。第 2 章では、Andreev 反射を記述する理論的な枠組みの解説、及び PCAR 法の原理について述べられている。第 3 章では、PCAR 法の改良手法として金などの非磁性体薄膜を用いて強磁性体表面を保護した系、即ち強磁性 / 非磁性 / 超伝導接合系における Andreev 反射について解析を行い、非磁性層が数ナノメートル程度の場合には従来型の PCAR 法と同じ解析式に基づいたスピン分極率の測定が可能である事が示されている。また、非磁性層の厚みがマイクロメートル程度の場合には、非磁性層内での多重反射によりコンダクタンスの電圧依存性に振動が現れ、その振動周期を解析する事で強磁性体のスピン分極率を決定する事が可能である事が示されている。これらの知見は、超伝導 / 非磁性 / 強磁性接合における電気伝導の理論的取り扱いの基礎としてだけでなく、新規なスピン分極率測定手法の提案として重要なものである。第 4 章では非接触型 PCAR 法の開発を目的として開発した新規シミュレーション手法について述べられている。非接触型 PCAR 法では真空のバリアを介したトンネル効果を扱う必要があり、走査型トンネル顕微鏡 (STM) の解析で用いられるリカージョン転送行列法を Andreev 反射の記述が可能な形式に拡張したシミュレーション手法を新たに開発した。この手法は第一原理計算との相性も良く、将来、強磁性体表面における原子解像度のスピン分極率測定手法の開発に大きく貢献するものと期待される。第 5 章では、強磁性 / 高温超伝導接合系における Andreev 反射の解析結果について述べられている。高温超伝導体が拡張 s 波、及び d 波の場合についてそれぞれ解析が行われている。ゼロバイアス・コンダクタンスの解析解を導出し、拡張 s 波、及び d 波どちらの場合にもゼロバイアス・コンダクタンスの値から強磁性体のスピン分極率の決定が可能である事が示されている。また、d 波超伝導体の場合にはコンダクタンスのバイアス依存性からもスピン分極率が決定可能である事が示されている。これらの知見は、高温での PCAR 測定を可能にする重要なものである。第 6 章は結論である。

以上要するに、本博士論文は超伝導体と強磁性体を含む接合における Andreev 反射の理論・シミュレーション解析を行い、従来型の PCAR 法における弱点を克服した新規スピン分極率測定手法の理論提案を行って

り、電子・物理工学、およびスピントロニクス的发展に大きく寄与するものと考えられる。

平成 25 年 2 月 19 日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。