

論文審査の結果の要旨

氏名 松田 亮史

本論文は5章からなり、第1章では本研究でとりあげる研究の強磁性単一電子トランジスタの説明と本研究の動機が述べられている。強磁性単電子トランジスタはクーロンブロケードとトンネル磁気抵抗という電荷とスピンの関与する電気伝導が共存する点で興味深い。従来、クーロンブロケード領域の磁気抵抗が低温で増大することが報告され、その起源として高次のコトンネルが提案されていることが述べられている。しかし、この提案にはまだ確証がなく、その解明が本研究の動機とされている。そのシナリオとして、従来になく広い範囲をカバーする接合抵抗をもつ試料を作って、その磁気抵抗の温度依存性を理論と詳細に比較することがあげられている。

第2章では研究の背景が説明されている。強磁性体接合に対しては、一般に、平行スピン、反平行スピンそれぞれのトンネルコンダクタンスを障壁両側の強磁性体のスピン状態密度の積として与え、その差を使って磁気抵抗比が定義される。トンネル抵抗の計算では強磁性体のスピン状態密度はバルク d-バンド電子に対する値が用いられるが、s-バンド電子の寄与も無視できないことが紹介されている。次に、単一電子トランジスタのクーロン振動が、標準理論で、コトンネル効果が2次摂動論で定式化されることが紹介されている。

第3章は試料作製と抵抗測定法に関する章で、まず、Ni(電極)/Co(クーロン島)/Ni(電極)の各接合に Al_2O_3 あるいはNiOを障壁層とする単一電子トランジスタをシャドウマスク法で作ったことが述べられている。Geを挟み込んだレジストを使って酸化膜作成プロセスによる微小強磁性金属を保護することによって接合抵抗を $0.6\text{k}\Omega$ から $3.3\text{M}\Omega$ まで高めることに成功している。なお、接合抵抗は、接合面積の大きさを変えることでも調節されている。この技術改良は、従来の試料では実現することができなかった抵抗範囲での実験を可能にした点で、本研究のポイントである。測定手法は一般的なもので、簡潔にまとめられている。

第4章では、実験結果の詳細、それに基づく解析と議論に関する章である。実験結果としては、まず、 4.2K での磁気抵抗測定では、数%程度の磁気抵抗

比が得られ、その値は、 Al_2O_3 障壁の試料では NiO 障壁の試料より、一様に高い。その原因として、 NiO が反強磁性的であり、トンネル電子のスピンの反転を起こす可能性があることが推論されている。強磁性単一電子トランジスタの特殊性を示す一例といえる。つぎに、零磁場コンダクタンス振動の $E_c/k_B T_e$ (クーロンブロケードの温度安定性の目安、 E_c : 単一電子帯電エネルギー、 T_e : 電子温度) 依存性の実験とクーロンブロケードに対する標準理論、コトンネル理論の比較が示されている。これにより、0.3K 以上の実験では、標準理論が使えるが、それより低温では、コトンネリングが重要であることが明らかにされている。これは、磁気抵抗の実験の前提になっていて、低温での磁気抵抗に対しては、コトンネル理論を想定する必要が有ることが予見されている。本研究の成果の第 2 のポイントである。次に、極低温 (25mK) での磁気抵抗測定の結果が示され、4.2K に比べて、10 倍程度の磁気抵抗の増大が観測されている。さらに、温度変化の全てのデータが磁気抵抗比と $E_c/k_B T_e$ の関係のグラフにまとめられている。これにより、 $E_c/k_B T_e = 2 \sim 3$ 以上で磁気抵抗比が、接合抵抗の大小に依らず、一様に増大することが示されている。これは、本研究オリジナルの知見で、磁気抵抗の温度依存性の説明には、 $E_c/k_B T_e$ の関数として変化するような要因が必要であることを示唆している。これを説明すべく、まず、標準理論、コトンネル理論との比較がなされ、いずれも適合しないことが示されている。次に、磁場中での接合容量の変化を考慮した計算が示されている。これは、低温で磁気抵抗比を増大するように働くので、ある程度実験を説明するが、十分ではない。このため、論文では、従来のコトンネル理論に帯電エネルギーや接合抵抗の温度変化を取り入れる必要が有ることが議論されている。これらの要因は、強磁性体トンネル接合の特殊性に関わるもので、不明な点が多く、推論の域を出ない。しかし、実験で得られた磁気抵抗の結果は非常に明瞭で信頼性があり、今後の理論的解釈のための大きな指標となるであろう。

第 5 章では研究結果が簡潔にまとめられている。

以上、各章を紹介しながら本論文の物理学への貢献点を解説した。作成法を工夫することによって、従来になく優れた特性を有する試料を実現し、これにより、実験的に強磁性単一電子トランジスタにおける低温での磁気抵抗増大の起源を明らかにしようとする研究は独自性の高いもので、得られた結果も当該分野に対して、学術的に優れた寄与をしている。これをまとめた本論文は、学位論文として十分な水準にあることが審査員全員によって認められ、博士論文

として合格であると判定された。なお、本論文の内容は、国際会議のプロシ
ディング (World Scientific) に掲載されているほか、Physica B 誌に掲載が
予定されている。この論文の業績は第一著者である論文提出者が主体となつて
実験、及び結果の解釈を行ったものであり、論文提出者の寄与が十分であると
判断される。

したがって、博士 (理学) の学位を授与できると認める。