

論文審査の結果の要旨

氏名 石井 裕司

常伝導(N)-超伝導(S)接合系では、超伝導状態が常伝導側へサブミクロンのスケールでしみ出し（長距離近接効果）、これに起因して、常伝導側の抵抗が超伝導転移温度(T_c)以下で下がり、さらに低温側（サウレスエネルギーに相当する温度以下）では逆に上昇する（リエントラント現象）ことが知られている。一方、強磁性(F)-超伝導(S)接合系では、交換相互作用のために近接効果が抑制されるので、N-S系のような現象は起らないと考えられていた。しかし、最近の実験では、Ni-Al、Ni-SnのF-S系でN-S系に類似した抵抗の温度変化が観測され、理論では説明できない長距離近接効果の存在を意味するのではないかとして注目を集めた。一方、同様な実験結果は接合界面附近でのスピン蓄積効果を考慮すれば長距離近接効果がなくても説明できることが理論的に指摘された。この理論は、抵抗変化の大きさが接合界面の抵抗と同程度であれば、 T_c より低温側での抵抗の温度変化は近接効果よりもむしろ界面の性質に大きく影響されることを示すもので、界面に注意した試料でF-S系の近接効果を実験的に調べ直す必要があることを示唆している。

修士（理学）石井祐司提出の学位請求論文は、このようなF-S系の接合界面の問題に着目して、近接効果の存在の有無を実験的に検証しようとするものである。具体的には、In-situプロセスにより従来になく清浄な界面をもつF-S系、N-S系、意図的に酸化膜を挟んで界面を汚したF-S系を作製し、その抵抗の温度変化を測定することにより、長距離近接効果の影響、及び接合界面近傍の抵抗特性の要因が調べられている。従来のF-S系は、F部を真空中で作製した後、一度真空装置から取り出して電子線描画などのプロセスを行い、再度真空中でS部を蒸着するという手順で作られていた。S部の蒸着の直前には、界面を清浄にするためArスパッタで少しF表面を削るが、この方法では界面の加工損傷が避けられない。これに比べて、本論文の研究で作られた試料は加工損傷のない界面をもっており、これを使って従来になく質の高い実験が行われ、そのデータを基に有意義な知見が導かれている。以下にその具体的な内容を解説する。

本論文は6章からなり、第1章ではN-S、F-S系の超伝導近接効果の一般的説明と研究の現状が紹介されている。まず、N-S系における超伝導近接効果がAndreev反射の描像で理解されること、実験的には、0.1ミクロン以上の超伝導状態のN側へのしみ出し、低温での抵抗のリエントラント現象などが観測されていることが述べられている。次に、F-S系について、交換相互作用のために近接効果が抑制されるという予測に反して、長距離近接効果の存在を示唆するような

抵抗の温度変化が観測されていることが簡潔にまとめられている。

第2章では本論文の研究の理論的背景と目的が説明されている。N-S界面近傍の性質を記述する理論として、界面をデルタ関数障壁としてその両側のN、S部をAndreev反射のバリステック描像で扱う理論（BTK理論）、また、この理論で無視されている近接効果を扱うための擬古典的なグリーン関数法が紹介されている。続いて、後者の理論に対応する実験結果として T_c 以下でのN側抵抗の減少とさらに低温での抵抗増加（リエントラント現象）が紹介されている。一方、F-S系については、実験で0.3ミクロン以上の長距離近接効果の存在を示唆するような T_c 以下での抵抗変化が観測されているものの、定量的には近接効果の理論に合わないこと、最近の理論によれば、この実験結果は近接効果ではなく界面抵抗が大きいことに関係付けられていることが説明されている。これを踏まえて、F-S系については従来の実験を見直す必要があり、そのためには、まず、清浄な界面をもつF-S系の作製が重要であることが述べられている。本章の記述から、十分な動機と意義をもって研究が進められたことが推測される。

第3章は清浄な界面をもつF-S系の作製技術の開発に関する章で、微小トンネル接合の形成に良く用いられるシャドウマスク法を利用して、2種類の金属を連続的に蒸着して、しかも両金属が十字形に交わるような、つまり接合を十字の交差部分にもつような試料を作ったことが述べられている。試料は、Ni-Al、Ni-SnのF-S接合、及び比較のためのCu-AlのN-S接合で、これらが従来になく清浄な界面をもつことは、第4章の実験結果によって裏付けられる。また、界面抵抗の大きい試料として意図的に薄い酸化膜を挟んだF-S接合も作られている。試料の種類や測定端子の構成には、0.2ミクロン以上の長距離近接効果によるF側抵抗への影響、界面附近の抵抗特性、さらに界面の清浄性の影響などが整理して調べられるような工夫が行われている。

第4、5章は本研究の成果をまとめた章で、それぞれ、実験結果の詳細、それに基づく解析と議論が述べられている。実験結果としては、まず、長距離近接効果を見るための抵抗測定では、N-S系では0.2ミクロン以上の長距離の近接効果を反映したN側抵抗の温度変化が見られたものの、F-S系ではその痕跡が見られなかったことが述べられている。これは、0.3ミクロン以上の長距離近接効果があるとする従来の報告と相反する。データの品質から見て、本研究結果の方が明らかに信頼性があり、また、F-S系では交換相互作用のために長距離近接効果が抑制されるとする理論予測を裏付けている。次に、界面附近の抵抗測定では4端子法により、(A) 主にS側抵抗を検出する測定と (B) S側、F (N) 側、界面の抵抗を検出する測定、が行われている。(A) では、F-S、N-S系いずれについても、 T_c の温度とそれより低温 ($T_c' < T_c$) の2段階で抵抗が急激に減少する様子が観測され、これが接合の存在のために接合部S側の超伝導転移温度が低下するという「逆近接効果」を示唆することが述べられている。この4端子測定が必ずしもS側の抵抗変化だけを検出している訳ではなく、実際には界面全体の影響も受けていること

など、結論付けるには早計であるが、実験結果は非常に明瞭で、興味深い。N-S、F-S系の分野において、今後の重要な研究テーマにも成り得ると思われる。

(B) では、 T_c 、及び上記 T_c' ($<T_c$) で抵抗ピークが観測され、 T_c でのピークについては、電荷の不均衡によること、 T_c' でのピークについては界面抵抗が低い場合にのみ出現するピークであることが述べられている。特に、 T_c' でのピークは今回の実験で初めて観測されたもので、BTK理論と接合部分での電流分布を考慮した計算を行うことにより、界面抵抗との関係がよく説明されている。また、この説明を実験的に確認する意味で、酸化膜を挟んで界面抵抗を大きくしたF-S系の試料では T_c' での抵抗ピークが見られないことが示されている。これらの界面抵抗に関する結果は、本論文の研究で用いられたF-S系、N-S系試料の界面の清浄度が極めて高いことを保証する重要な結果である。それだけに、注意深い実験と解析が行われていて、これにより本論文の実験が従来に比べて高い信頼性をもっていることが確認される。(A)、(B)の結果は、F-S系、N-S系いずれの系でも界面が重要な役割を果たすことを示すもので、当該分野にとって貴重な知見を提供している。最後に、F-S系の超伝導のしみ出しを調べるために、(C) 0.2ミクロン以下の近接効果によるF側抵抗への影響と界面近傍の抵抗の寄与の両方を含んだ4端子抵抗測定を行い、Sn-Alの系についてのみ、 T_c の低温側で少し抵抗が下がってから大きくなるというリエントラント的な特徴を観測したことが述べられている。これは、従来のリエントラント描像とは合わないものの、BTK理論でも説明できないことが示されている。一方、超伝導状態のしみ出しを仮定するとその長さは計算値 (3 nm) と同程度と考えられることが述べられている。この結果は、F側への超伝導状態のしみ出しが、0.1 mm程度といった長距離ではないにしても、nmのオーダーでは存在する可能性を示している。

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。最高級の品質の試料を使って、実験的にF-S系における近接効果の有無、F-S、N-S系の界面抵抗の影響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(理学)の学位を授与できると判定された。なお、本論文の内容は、Physical Review B (Rapid Communications) 誌に投稿が予定されている。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って実験、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。