

微細加工によって作製されたトンネル接合の性質

Electric properties of the tunnel junctions prepared by micro-fabrication

代表研究者 東京大学物性研究所助教授 小森 文夫
Assist. Prof., The Institute for Solid State Physics, The Univ. of Tokyo
Fumio KOMORI

In the tunnel junctions of nano-meter scale, the junction capacitance is small enough to make the charging energy larger than thermal energy, and than the Josephson coupling energy when the electrodes are superconducting. It is expected that the large charging energy causes peculiar current-voltage characteristics and charge oscillations. To study the electric properties due to such charging effect in the small junctions quantitatively, we developed a method of micro-fabrication. We have established a reliable fabrication process of the junction with the area of $60 \times 60 \text{ nm}^2$. Using the aluminum junctions of this size, we measured the current-voltage characteristics at temperatures down to 30 mK in and out of magnetic fields, and with and without the irradiation of microwave. We found clear evidence of the charging effects in the current-voltage characteristics of the junction in normal state, and that of the single electron oscillation. Further detailed study of the charging effects using these technique is progressing.

研究目的

正常金属間の微小なトンネル接合では熱エネルギーよりも大きな帯電効果のために、また微小なジョセフソン接合では電荷移動にともなう帯電エネルギーがジョセフソンエネルギーと同程度に大きくなるために、接合間で電荷の振動や特異な電流電圧特性が現れることが理論的に予想されている。この振動の振動数は電流に比例しているので、電流を精密に決める電流標準として応用が期待できる。また、これらの効果と交流ジョセフソン効果との組合せや、外部から接合の電荷や並列抵抗値を制御することにより、特異な電流電圧特性をもつ能動素子や微小な電荷を検出する素子などが考え出されている。さらに、このような応用面ばかりでなく、そもそも、どのような場合に超伝導体間の微小な接合にジョセフソン効果が現れるかが興味をもたれており、量子力学の基礎問題との関係が議論されている。

本研究の目的は、このような興味深い現象が予想されている微小なトンネル結合の基本的な特性を調べることである。より具体的には、電子線微

細加工技術を用いて、接合面積が $0.2 \mu\text{m} \times 0.2 \mu\text{m}$ 以下で、帯電エネルギーが数十 K 以上になる微小なトンネル接合を作製する方法を開拓し、その接合の基礎的な電気特性を調べ、この系を支配している物理的な機構を理論との比較などにより検討し、どのような方法でどのような特性の接合が作製できるかを明らかにする。特に、再現性のよい接合の作製と極低温での詳細な特性評価に重点をおくこととする。

研究経過

1. 微細加工法の開発

本研究を始めた時点までに、電子線微細加工技術を用いた微小なトンネル接合の作製について、米国、オランダ、スウェーデンなどで研究が行われてきていた。彼らは、電子線露光用のレジストの合成やエッチング技術の開発などにより、微小トンネル接合を作製してきた。彼らの行っている方法のうち、レジストを二層にして加工を行うか、酸素プラズマによるレジストのエッチングで、最終的に小さな橋構造を作製する方法が、我々の研究室で使える装置を用いて研究を行う上

で適していると判断した。また、この方法では、接合面積が数十 nm×数十 nm までの接合しかできないと予想されたので、より小さい接合が作製できるように電子線によって基板上に描かれる汚れを利用する方法の開発も行うことにした。これらの開発の過程で、レジストに描かれたパターンを光学的に観察するために高倍率の金属顕微鏡を利用した。

1.1 二層レジストによる方法：レジストの材料となるプラスチックのうちで、市販のものを各種購入し、どのレジストがトンネル接合の作製に使用できるかを調べることから始めた。まず、プラスチックを溶かすための溶剤を各種検討し、プラスチックの濃度と基板にスピニングした後の膜厚との関係を調べ、均一に数百 nm の膜厚になる条件を捜した。次に、この均一なレジスト膜に電子線で描画を行った後、現像してレジストの感度、解像度を調べた。ここで、電子線のエネルギー、ドーズ量、現像液の種類、濃度、時間、温度などのパラメーターを系統的に変えて、そのレジストでの最良の描画条件を捜した。その結果、スウェーデンや米国のグループが用いているものと同じ系統の PMMA-MAA コポリマーのなかで二層レジスト法の下層レジストとして適当なものを見いだした。また、上層のレジストとしては、一般的なレジスト材の PMMA のなかで適当なものを見いだした。

この組合せのレジストを用いた二層レジストの方法で、微小トンネル接合を作製する条件を、再び、電子線エネルギー、ドーズ量、現像液の種類、濃度、時間、温度などのパラメーターを系統的に変えて捜し、接合面積が最小で 60 nm×60 nm のトンネル接合を作製できるようになった。特に、英国への渡航による研究・意見交換において海外の研究者から得た接合の作製方法の情報をもとに、こちらの装置やレジストに合った再現性のある接合作製条件を見いだすことができた。

接合の金属としてはアルミニウムを用いた。アルミニウムの接合では外部磁場を変えることにより、超伝導接合、正常金属間接合の両方の研究ができる。また、トンネル障壁となる酸化物が容易

に作製できるという利点もある。

1.2 酸素プラズマエッチングによる方法：最初に PMMA をレジストとして用いて、描画・エッチングの条件を捜したが、微小接合と大面積の配線が同時にできる条件がみつからなかった。そこで、二層レジストを用いて描画・エッチングの条件を捜したところ、200 nm×200 nm の接合面積をもつアルミニウムの接合が作製できた。ただし、この方法で、再現性のある接合作製するためには、現有のエッチング装置の改良を行わなければならないことが判明した。この時点で、1.1 の方法の完成が予想されたので、装置の改良のための予算、人手、時間なども考慮して、この方法の開発はこの段階で中断した。

1.3 電子線によって基板上に描かれる汚れを利用する方法：この方法は、低真空中で電子線描画を行うことにより、基板に付着した汚れを接合の作製に利用するものである。そこで、まず、真空度、電子線のエネルギー、ドーズ量をパラメーターとして基板に付着する汚れの程度を系統的に調べた。あるパラメーターの範囲で、長さ数十 nm の汚れを付着させることができた。しかし、この方法では、装置全体が電子線描画によって汚染され、他の目的の電子線描画に支障をきたすようになった。装置汚染の低減と汚れの描画付着の再現性の向上のためには、現有の描画装置を改良して、基板の近傍に汚れを付けるためのガス放出口を取り付けなければならないと判断した。ここでも、改良のための予算、人手、時間などを考慮して、この方法の開発はこの段階で中断した。

2. トンネル特性の測定

前項 1.1 および 1.2 の方法で作製したアルミニウムの微小トンネル接合列のトンネル特性を 30 mK までの温度と 4 T までの磁場中で、これらをパラメーターとして測定した。初期の測定では外来あるいは測定装置からの電氣的雑音が精密な測定を妨げていたが、電子回路、フィルターなどの改良作製を行うことによりこれらを克服し、低雑音高感度の測定ができるようにした。測定項目は、電流掃引、電圧掃引による電流電圧特性、および、マイクロ波照射中の微分抵抗のバイアス電

流依存性である。

接合トンネル抵抗の低い試料では、主として磁場がない場合のジョセフソン臨界電流のトンネル抵抗依存性および接合容量依存性を調べた。巨視的量子トンネル効果のために、臨界電流は明確に決められなかったが、トンネル抵抗が高いほど平均臨界電流が小さくなる傾向が観測された。これらの試料では、巨視的量子トンネル効果を考慮するために、より精密な測定を繰返す必要があったが、その測定をする時間が十分ではなかった。また、マイクロ波照射中の微分抵抗には異常が観測されなかった。

トンネル抵抗の高い試料では、磁場を変えることによる超伝導エネルギーギャップの消滅、高磁場中での接合のクーロン・ブロッケイドや単電子振動について詳しく調べた。また、英国への渡航による研究・意見交換においては、それまでに作製した接合トンネル特性をもとに議論し、その後の研究の指針を得ることができた。

研究成果

1. トンネル接合作製技術の確立

二層レジストによるトンネル接合作製技術を完成し、再現性良く接合面積が $60\text{ nm} \times 60\text{ nm}$ のアルミニウムのトンネル接合作製できるようになった。

2. 微小トンネル接合の極低温における電気特性

2.1 常伝導接合の帯電効果: アルミニウムの超伝導が完全に破壊されている高磁場中において、低温では帯電効果によるクーロン・ブロッケイドを観測した。接合の静電容量、高温でのトンネル抵抗依存性から、この現象が観測できる条件を明らかにした。また、接合列におけるクーロン・ブロッケイドの接合数依存性から、接合列中にソリトンが形成されている効果が現れていることがわかった。

2.2 常伝導接合の単電子振動: クーロン・ブロッケイドの現れる試料で、ある強度のマイクロ波照射中の微分抵抗の電流依存性にマイクロ波周波数に依存した異常を観測した。これは、定電流駆動している接合における単電子振動の周波数が

マイクロ波周波数の整数倍のとき起こる微分抵抗の異常と解釈できる。この現象の、マイクロ波の強度や周波数依存性、接合列の接合数依存性、接合の電気容量依存性、外部磁場依存性などを調べ、この解釈の確認と、現象の観測できる条件を明らかにした。

2.3 超伝導接合の臨界抵抗: トンネル抵抗が高いほど、ジョセフソン臨界電流は低くなったが、ジョセフソン効果の消滅する試料での臨界トンネル抵抗は、理論で予想されている普遍的な値よりも高くなっている。これは、接合の面積が最も小さい試料でも、普遍的臨界抵抗が観測できるほどは静電容量が小さくないからであると考えられる。

2.4 小さな超伝導体の準粒子状態密度の異常: 接合の電流電圧特性より調べられる電極超伝導体の準粒子の状態密度に、超伝導のゆらぎに起因する異常を観測した。

今後の課題と発展

1. 微細加工技術: 広範な応用のためには、さらに小さい接合を用いて、高温で帯電効果が現れるようにする必要があるが、二層レジストの方法では接合の面積をこれ以上小さくすることが困難である。酸素プラズマを使う方法や、汚れを利用する方法の開発を進め、現在よりも小さいトンネル接合を再現性良く作製する方法を確立する。

2. 常伝導接合: 各種の繋がり方をもつ接合の二次元ネットワークや、帯電効果の応用に重要なゲート電極を取り付けた接合の特性を調べる。

3. ジョセフソン接合の臨界抵抗: 普遍的臨界抵抗を観測するために、接合の静電容量が小さい試料で精密な実験をする。その後、並列抵抗を人工的に接合に付加し、臨界電流がどのように変化するかを調べ、超伝導スイッチ素子への応用の可能性を探る。また、二次元ネットワークで実験を行い、臨界抵抗の接合配列依存性を調べる。

4. ジョセフソン接合のブロッホ振動: 微小なジョセフソン接合におけるブロッホ振動の存在を、試料となる金属を変えるなどの広範囲の接合パラメーターについて調べる。

5. 微小なトンネル接合を用いた能動素子:

クーロン・ブロッケイド，単電子振動，ブロッホ振動，交流ジョセフソン効果など示す接合やゲート電極を付けた接合を単独あるいは組合せて作製し，新しい機能をもつ能動素子を実現する。

6. 超伝導近接効果への応用：トンネル接合を作製する方法を微小な超伝導近接接合の作製に応

用し，新しい現象の発見や，機能素子への応用法を探る。

7. 超伝導ゆらぎ：微小な超伝導電極の超伝導ゆらぎを微小トンネル接合を用いて詳しく研究する。