

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 西尾 隆宏

本論文は、「極低温走査トンネル顕微鏡を用いたナノアイランド構造における超伝導状態の研究」と題し、ヘリウム3冷却温度および磁場下で動作する超高真空走査トンネル顕微鏡 (STM) によるトンネル分光測定からサイズが数十から数百ナノメートルの Pb アイランド構造の超伝導状態に関する実験結果と考察をまとめたものである。本論文は全8章から構成されており、第1章は「序論」、第2章は「超伝導について」、第3章は「実験手法と実験装置」、第4章は「Pb アイランド作製と量子サイズ効果」、第5章は「Pb アイランドの超伝導状態と渦糸状態」、第6章は「渦糸状態のサイズ効果」、第7章は「渦糸状態の操作」、第8章は「総括」について述べている。

第1章は序論であり、研究背景や本研究の特長・内容等について言及している。

第2章には超伝導に関する記述があり、まずは超伝導全般に関する一般的な解説ののち、本研究と関連の深い薄膜での超伝導や微小超伝導体に関して知られている知見やこれまで行われてきた研究結果をまとめている

第3章では、本研究において主に使用した手法である STM およびその分光手法である走査トンネル分光(STS)について説明した後、本研究で用いたヘリウム3冷却の低温 STM 装置に関する説明、及び、本研究で加えた幾つかの改良点について述べている。さらに、装置の性能評価として、低温 STM の標準試料である NbSe₂ 劈開面の観察から本研究遂行に十分な低温が実現されていることを確認し、Si(111)-7x7 表面を用いて研究に必要な十分な超高真空条件が達成されていることを検証している。

第4章には、Pb ナノアイランドの作製方法やその形状や電子状態の評価に関する記述がある。超高真空中の極めて清浄な環境で Si(111)-7x7 基板上に Pb を低温蒸着しその後室温でしばらく放置することにより、表面が平坦で膜厚が原子層スケールで制御された Pb ナノアイランド構造が形成でき、その冷却温度の調整によってアイランドのサイズをある程度制御できることを報告している。またアイランドの膜厚が Pb のフェルミ波長の数倍程度であることを反映して量子サイズ効果による量子井戸準位が形成されることがこれまでの研究により知られているが、ここでもトンネル分光スペクトルによるその準位の検出について触れ、さらに二次元でのトンネル分光による量子井戸準位の強度分布測定についても言及している。

第5章では作製した Pb ナノアイランドの超伝導特性をトンネル分光により評価した結果について述べている。まず、磁場が印加されていない状態ではトンネル分光による超伝導ギャップの形状はアイランド内での場所に依らず均一であることが示された。一方、垂直磁場中では、超伝導ギャップのアイランド内での場所依存性が観察され、そのことを詳細に調べるために、超伝導破壊に起因したフェルミ準位での電子状態密度を表すゼロバイアスコンダクタンス (ZBC) の磁場依存性のアイランド内での中央部や周辺部での測定や、ZBC 分布像の観測を試みている。その結果、ある大きさの Pb アイランド上ではある磁場以上で中央部のみ超伝導が壊される現象を見出し、線形化したギンツブルグ・ランダウ (GL) 方程式の結果との比較や臨界磁場近傍に見られたヒステリシスなどから、これが渦糸状態の形成によるものと結論している。

第6章では、前章で見出した渦糸状態の生成消滅に関するアイランドのサイズ効果に関して言及している。同じ膜厚でサイズの異なる幾つかの Pb アイランドに対して ZBC の磁場依存性測定や ZBC 像観察を行い、径が小さいアイランドでは渦糸が侵入せず、また大きいアイランドほど渦糸侵入の磁場やアイランド全体の超伝導が壊れる磁場が低くなる傾向が観察された。こうした傾向はこの膜厚のアイランドのコヒーレンス長の値を仮定した上で計算された線形化された GL 方程式や時間依存の非線形 GL 方程式から予想される傾向と定性的に一致していることが示され、また仮定したコヒーレンス長も同じ膜厚の薄膜において測定された値と矛盾しないことが示されている。

第7章では、STM 探針へのパルス電圧の印加による渦糸状態の励起に関して述べている。磁場を渦糸侵入磁場よりもわずかに小さい値に設定し、探針に適当なパルス電圧を加えることにより渦糸が励起できることを見出し、磁場が十分に臨界磁場に近いか、パルス幅が十分に長いことなどその励起条件について言及している。加えて、他の条件が等しければアイランドの周辺部にパルスを加えたほうが中心部に比べ渦糸を励起しやすいことを見出し、外部からの渦糸侵入における表面エネルギー障壁がトンネル電流注入により局所的に弱められたことによるものとしてこの現象を説明している。

第8章は総括であり、これまで述べてきた研究結果についてまとめている。

以上をまとめると、本論文では、超高真空中の極めて清浄な環境でナノサイズの超伝導体を作製し、アイランドサイズの制御とその渦糸状態の STM による実空間観察を通して、渦糸形成の臨界サイズ領域におけるアイランドサイズ依存性を明らかにした。さらにアイランド中の渦糸侵入における表面エネルギー障壁をトンネル電流により低くすることによって、STM 探針による渦糸励起が可能であることを示した。低温 STM を用いたナノサイズ超伝導体の評価及び評価法の確立という点で、物理工学への寄与は非常に大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。