

論文内容の要旨

論文題目

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

氏名 西尾 隆宏

1. はじめに

近年、ナノテクノロジーの進歩とともに微小な超伝導体の研究が盛んに行われている。とくに **Pb** 超薄膜においてはナノサイズ欠陥による渦糸のピンニングといったナノ構造特有の超伝導現象が報告されている。しかしながら従来の作成・測定評価手法による研究では欠陥や不純物などの影響を除外することができず、また空間的に平均化された情報に基づく議論が主となるために曖昧な点が多く残されてきた。そこで本研究では一貫した超高真空中での試料作成を行い、その超伝導状態を原子分解能での電子状態測定が可能な走査トンネル顕微鏡 (STM) による実空間観察によって明らかにすることを目的とした。特に超伝導体のサイズ・膜厚を十分に制御することによりそのサイズ効果について詳細に調べることにした。

2. 極低温走査トンネル顕微鏡の作製

上記の目的を達成するために実験装置として超高真空・極低温下で動作する STM 装置の立ち上げ・改良を行った。この装置は超高真空中で試料の調製が可能であり、超高真空中で試料を STM 部分まで搬送することにより、試料を清浄に保ったままその場観察可能な構成になっている。探針については STM 測定前に電界イオン顕微鏡 (FIM) により金属的で鋭い探針であることの確認を行っている。STM 本体は超伝導磁石により試料に垂直方向に対して 7T まで磁場を印加することが可能であり、液体ヘリウム 3 冷却により最低到達温度 0.4 K まで冷却可能である。立ち上げ当初は試料温度が 1K 付近で停滞してしまうという問題があったが、信号線を低温で熱伝導の悪い NbTi 超伝導線に変更する、室温からの輻射熱を防ぐ熱シールドを 2 段に変更するなどの低温化対策によって、0.4 K まで冷却されていることを試料温度の直接測定により確認している。このことは低温 STM の標準試料である NbSe₂ へき開面の超伝導ギャップ測定からも確認している。超高真空についても Si(111)-7x7 再構成表面の観察を行うことによって原子分解能で清浄な表面が形成されていることを確認している。

3. Pb ナノアイランドの作製

超伝導体のサイズ効果について調べるために、Si(111)-7x7 清浄表面上に生成される

Pb ナノアイランド構造に着目した。この系では膜厚・サイズの揃ったアイランド構造が作製されることがこれまでの表面科学研究により知られている。図 1(a)に Si 清浄表面上に Pb 蒸着した試料の STM 像を示す。原子オーダーで均一な膜厚を持ち、横方向には直径約 100nm 程度のナノアイランド構造が形成できていることが分かる。蒸着時の基板温度を 180K~250K の間で制御することによって Pb アイランドのサイズが制御可能なことが知られているので、液体窒素による冷却機構とヒーターを備えた温度可変の蒸着ステージの作成を行い、これによりナノ Pb アイランドのサイズを制御することが可能になった。

また、このアイランドの膜厚は非常に薄くその電子のフェルミ波長程度であることから、基板と表面上の真空領域がエネルギー障壁として働くことにより膜厚方向に閉じ込められ、量子井戸状態 (QWS) が形成される。走査トンネル分光 (STS) により各膜厚での QWS を測定したところ、奇数層の薄膜と偶数層のそれとで大きく異なるなど、これまで報告されている研究と一致する結果が得られた。さらに異なる膜厚領域が隣接した部分で微分トンネルコンダクタンス (dI/dV) マッピングを行ったところ、QWS が膜厚に敏感に依存していることが観察された。

4.Pb ナノアイランドにおける超伝導状態と渦糸状態の観察

図 1(a)の Pb アイランドの超伝導状態の観察を行った。このアイランドの厚さは 9ML であり、同膜厚の Pb 薄膜に対して報告されているコヒーレンス長に比べ膜厚はかなり短いが横方向のサイズはやや大きい程度である。このアイランドの中心から 40nm 離れた点 B では(b)に示すような超伝導スペクトルが得られ、磁場を大きくするに従い超伝導ギャップの底が徐々に上昇することが分かる。これは磁場によってクーパー対が破壊されフェルミ準位の電子状態が増加するためである。そこでこのギャップの底の高さ、すなわちゼロバイアスコンダクタンス (ZBC) が超伝導状態の指標になっていると考え、さらに詳細に場所と磁場依存性について調べた。(c)では中心点 A と B で得られた ZBC の磁場依存性を示す。B における ZBC は磁場に対して単調増加するのに対し、A における ZBC は 0.6T 付近で飛びを示すことが分かる。このように場所依存が観察されたので ZBC の空間分布について調べた。図 1 (d)は 0.6T における ZBC 像である。中心付近で ZBC が高い値を示しており、超伝導状態が局所的に破壊されていることが分かる。この分布は線形な Ginzburg-Landau (LGL) 方程式において渦糸が 1 つ侵入した際のオーダーパラメータの空間分布とほぼ一致していることから渦糸状態であると考えられる。また中心付近の ZBC では磁場掃引方向によるヒステリシスが観察されており、これは渦糸の出入りに際しての表面バリアの存在に起因するものと考えられ、このことも観察された ZBC 分布が渦糸状態であることを支持する。

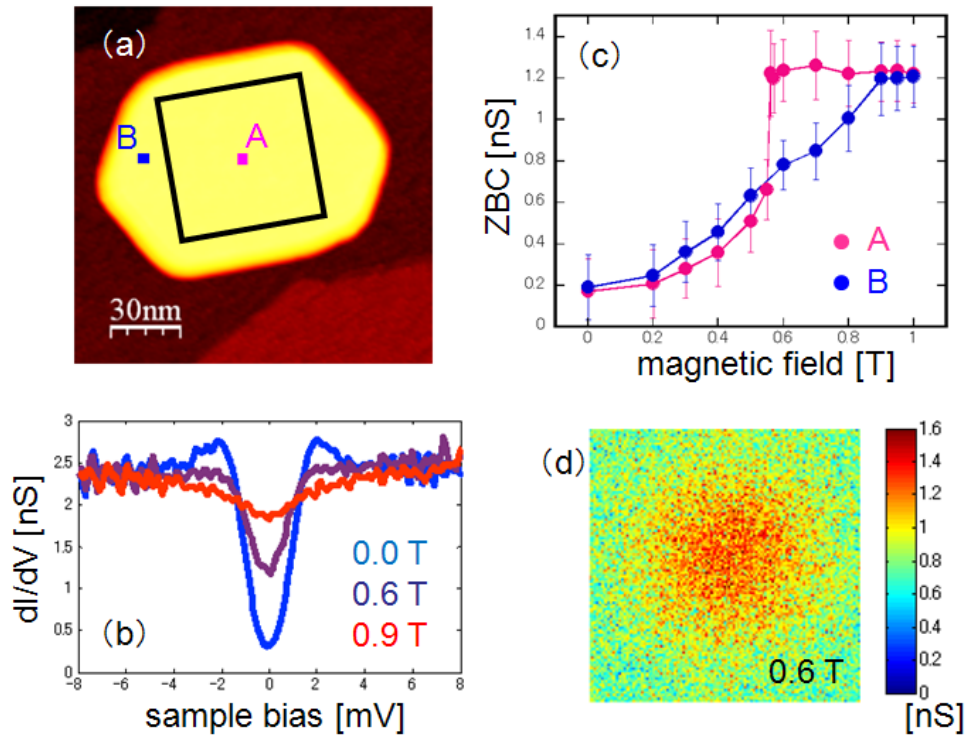


図 1(a)Pb ナノアイランドの STM 像 (b)B における超伝導スペクトルの磁場依存性 (c)ZBC の磁場依存性 (d) 0.6T における(a)中の黒線で囲まれた部分の ZBC 像

5.渦糸状態のサイズ依存性と膜厚依存性

続いてサイズが異なる Pb アイランドの渦糸状態について調べたところ、さらに大きいサイズの Pb アイランドではより低い磁場で渦糸が侵入し、さらに大きく縦長で楕円状のアイランドでは二つ目の渦糸が明瞭に観察された。一方でコヒーレンス長と同程度のサイズのアイランドではいずれの磁場においてもアイランド内での ZBC 分布は一様で、磁場に対して単調に増加することがわかった。このことはコヒーレンス長程度の大きさを持つ超伝導体に関する Gorkov の式を用いた理論計算の結果と一致している。小さいサイズのアイランド内では ZBC 分布が一様で空間的に変化がないことから渦糸は観察されないこととなり、渦糸の侵入には臨界サイズが存在することが分かった。

図 2 には 9ML のアイランドで得られた渦糸が侵入する磁場 $H_{e\text{ nuc},1,\text{up}}$ 、超伝導が完全に消失する磁場 H_{c3} 、磁場を減少させた際に渦糸が消滅する磁場 $H_{e\text{ nuc},1,\text{down}}$ とサイズの関係を示す。図から渦糸状態の形成には臨界サイズが存在し、大きなアイランドほど低い磁場で渦糸が侵入する傾向があることが分かる。この傾向は LGL 方程式による計算結果と一致しており、臨界サイズから見積もった Pb アイランドのコヒーレンス長の大きさは同じ膜厚の Pb 超薄膜におけるものと同程度であることが分かった。

また、膜厚の違いによる超伝導への影響についても調べた。同じアイランド内で異

なる膜厚が隣接した場所の ZBC のマッピングを行うことにより、膜厚によって超伝導が完全に消失する磁場が異なることが観察された。これは膜厚の変化によりコヒーレンス長が変化しそれに伴って H_{c3} が変化しているためであると考えられる。

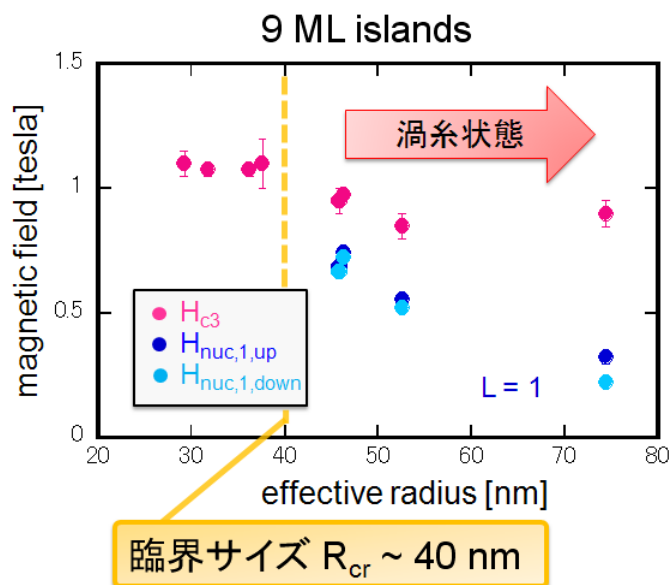


図2 Pb アイランドのサイズと臨界磁場の関係

6. 渦糸状態の操作

アイランドの超伝導状態における渦糸状態への転移に際してヒステリシスが存在することがわかったが、このことは転移直前の磁場下での状態が準安定であることを示唆している。そこで転移直前の状態においてバイアス電圧にパルス電圧を印加する実験を行った。その結果、パルス電圧印加によって渦糸状態が励起可能であることが分かった。さらにその励起はパルス時間の長さに依存することや同じパルス電圧条件ならば STM 探針がアイランドの外側にある方が渦糸状態を励起しやすいことが観察された。パルス電圧以外にも STM 探針による欠陥導入によって渦糸状態の操作が可能なが分かった。

7. 結論

最低到達温度 0.4K の超高真空中で動作する STM の立ち上げ・改良を行い、この装置を用いて膜厚・サイズの揃った Pb ナノアイランド構造を作製し、その超伝導状態の観察を行った。磁場印加によりアイランド中に渦糸が形成されることを観察した。さらにアイランドのサイズ依存性の測定から渦糸状態の形成には臨界サイズが存在し、大きなアイランドほど低い磁場で渦糸が侵入することが分かった。この傾向は LGL 方程式による計算結果と一致する。また、渦糸状態は電圧パルスや STM 探針による励起で操作可能であることも分かった。