

平成 21 年 6 月 11 日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2007 年度 -2008 年度
 課題番号：19310065
 研究課題名（和文） 走査プローブ顕微鏡による超精密ポテンシャル測定
 研究課題名（英文） Precise measurements of electrostatic potential using scanning probe microscopy
 研究代表者
 氏名（アルファベット）長谷川 幸雄（Hasegawa Yukio）
 所属機関・所属部局名・職名 東京大学・物性研究所・准教授
 研究者番号 80252493

研究成果の概要：

走査プローブ顕微鏡におけるポテンシャル測定技術を精密化することによって、二次元電子系の存在する表面での遮蔽されたポテンシャルやフリーデル振動を観察することに成功した。また、ナノサイズ超伝導体における渦糸の実空間観察やその振る舞いのサイズ依存性について測定し、渦糸侵入の臨界磁場を数十ナノメートルの個々の超伝導体に対して測定することに成功し、さらに渦糸侵入に対する最少のサイズが存在することも見出している。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	9,300,000	2,790,000	12,090,000
2008 年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
年度			
年度			
年度			
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

研究分野：表面科学、ナノサイエンス

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・薄膜・表面界面物性、
 ナノ・マイクロ科学・ナノ構造科学

キーワード：走査トンネル顕微鏡、表面・界面、静電ポテンシャル分布

1. 研究開始当初の背景

表面において電子が感じる一電子ポテンシャルは、表面上での吸着物の振る舞いや反応性などを左右する極めて重要な物性値である。この値は、通常、仕事関数や内殻準位シフトなどにより測定されるが、これらの手法では表面全面にわたる平均的な情報が得られるのみであり、欠陥など表面の不均一性がポテンシャルをいかに変化させるかを知ることが困難である。吸着物の振る舞いや反応に関しては、表面上の欠陥が重要な役割を担うことは明らかであり、それに絡むポテン

シャル変化を微視的レベルかつ高いエネルギー分解能で測定したいという要求は高い。

しかしながら、これまでの測定ではエネルギー分解能が 100meV 程度であり、より微細なポテンシャル変化を伴う物理現象の解明には及ばない状況であった。

2. 研究の目的

本研究では、走査トンネル顕微鏡（STM）分光（STS）による表面準位測定を通じて、表面での静電ポテンシャル分布を精密に測定する技術を開発し、そのエネル

ギー分解能を高めて、ポテンシャルに関連する表面での物理現象を実空間で明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

STSによる微分コンダクタンス (dI/dV) の測定から表面での局所電子状態密度 (LDOS) を測定できることは良く知られている。本研究では、STSによるLDOS測定を通じて表面準位のエネルギーレベルの変化から静電ポテンシャルを測定している。

図1にSTSによるポテンシャル測定の実験原理を示す。表面でのポテンシャルが変化するとそれに伴って表面準位のエネルギーレベルも同じように変化する。したがって、どの準位でもよいが、ある特定の表面準位に着目し、その準位のエネルギーレベルを測定すれば表面での(相対的な)ポテンシャル値が求められることになる。

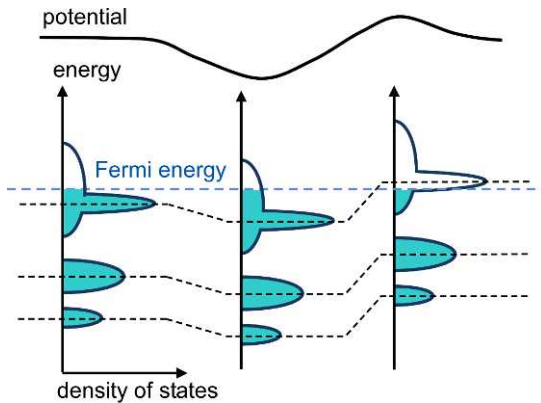


図1 ポテンシャル測定の実験原理

実際の測定では、温度変化によるドリフトが極めて小さい液体ヘリウム冷却のSTM装置を用い、表面を走査しながら各点でのトンネル電流スペクトル ($I-V$ 特性) の測定を行い、ポテンシャル分布像を得ている。

また同様の手法により、ナノサイズ超伝導体であるPbアイランド構造に侵入した磁気渦糸の実空間で観察し、それを通じて、渦糸侵入磁場の正確な測定やそのアイランドサイズ依存性の観測、さらには、探針電流による渦糸励起なども行っている。

4. 研究成果

半導体基板であるシリコン上に形成される2次元電子系として知られるSi(111) 3×3 -Ag表面上のステップ近傍において静電ポテンシャル測定を行った。

同表面の表面準位のうち、フェルミ準位から -0.8eV あたりに観測されるS2/S3準位のエネルギーレベルの変化から測定している。

ステップから離れたテラス上から徐々に

ステップに近づいていった際の各点でのトンネル微分コンダクタンスを見ると(図2)、ステップ端に近づくにつれて高結合エネルギー側(低試料バイアス電圧側)へ移動していることがわかる。これは、先にも述べたように表面での静電ポテンシャル変化によるものである。

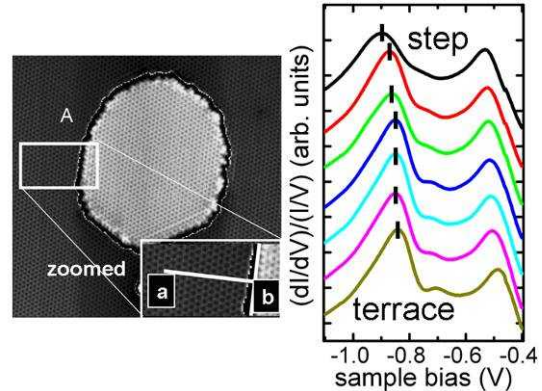


図2 ステップ近傍での微分トンネルコンダクタンス

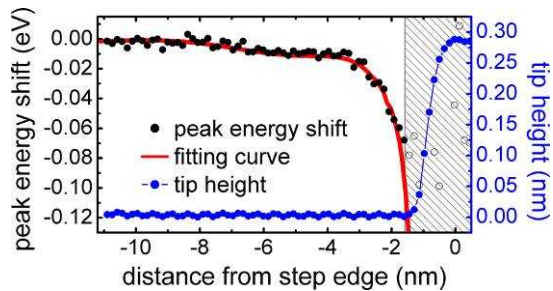


図3 ステップ近傍でのポテンシャル分布

このピークのエネルギーレベルのシフト量から求めたポテンシャル分布を図3に示す。黒点がポテンシャル分布を示し、青点がSTM像(トポグラフ)の断面を示している。このポテンシャル分布からもわかるように、ステップ端に近づくにつれてポテンシャルが減少しており、さらにポテンシャルが若干振動している様子が見てとれる(図4)。

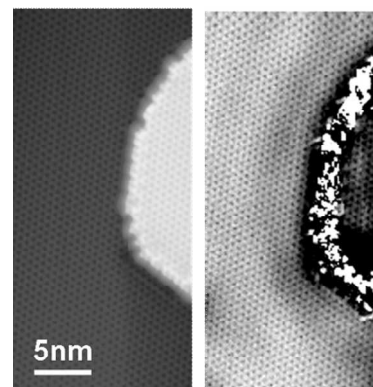


図4 STM像(左)とポテンシャル像

電子定在波との比較から、ポテンシャルに見られる振動構造の周期はフェルミ波長の半分であることが確認されている。このことは、この振動構造がこの表面に存在する二次元電子系による遮蔽効果によるもの、すなわちフリーデル振動であることを示唆している。そこで、Lindhardの線形応答近似を用いて、遮蔽ポテンシャルを求め、実験結果と比較すると(図3中の赤線が計算値)良く一致しており、観察されたポテンシャルが二次元電子系による遮蔽ポテンシャルであることが確認できた。

今回の遮蔽ポテンシャルやフリーデル振動の測定は、高い空間分解能($< 1 \text{ nm}$)およびエネルギー分解能($< 10 \text{ meV}$)でのポテンシャル測定を実現することによって初めて達成される。本測定は、我々のポテンシャル測定の分解能の高さを物語るものである。

また、同様の微分コンダクタンス測定により、ナノサイズ超伝導体における磁束(渦糸)の直接観察にも成功している。Si(111)清浄表面上にPbを蒸着すると、図5に示すような原子層(ML)オーダーで均一な膜厚を有するPbアイランド構造を作成できる。

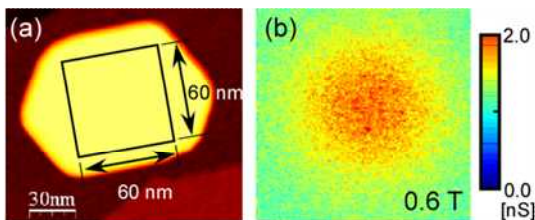


図5 Pbアイランド構造のSTM像(左)とその中に生成された渦糸

垂直方向に磁場を印加しつつ、バイアス電圧0V(超伝導ギャップの底)での微分トンネルコンダクタンス(ZBC)像から、図5右図のように、量子磁束(渦糸)を直接的に捕えることができる。

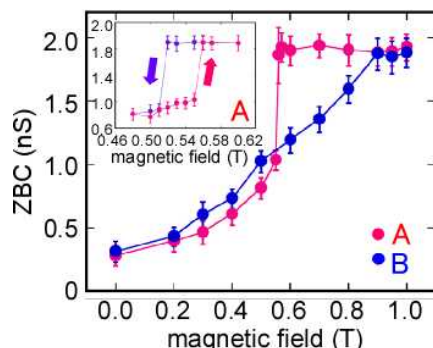


図6 ZBCの磁場依存性

図6に示すZBCの磁場依存性のプロットにおいて、立ち上がる磁場から量子磁束が侵入

する磁場を、個々のアイランドに対して直接的に測定することができる。いろいろなサイズを持つアイランド構造に対して磁束侵入磁場 H_{p1} 、排斥磁場 H_{e1} 、超伝導転移磁場 H_{sn} を測定したところ、図7に示すようなサイズ依存性を示した。

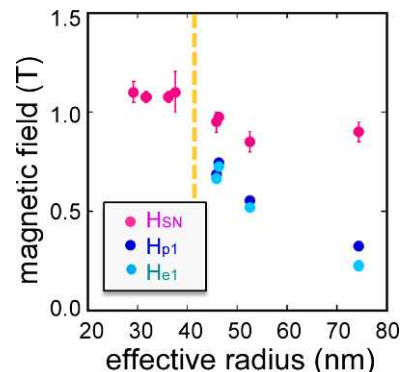


図7 臨界磁場のサイズ依存性

サイズ依存性の測定から明らかに、量子磁束侵入には最小サイズがあることがわかる。Ginzburg-Landau方程式による解析では、磁束侵入のためには、超伝導のコヒーレンス長の1.3倍の大きさが必要と予測されていた。量子磁束の形状から求めたコヒーレンス長の1.3倍に相当する大きさを図7の黄色線で示しているが、明確に磁束侵入するアイランドとそうでないものを分けており、理論予測と一致していることが明らかとなっている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計16件)

西尾隆宏・安東秀・江口豊明・長谷川幸雄「極低温走査トンネル顕微鏡によるPbナノアイランド構造の超伝導特性」固体物理、43巻10月号、665-673(2008)(査読なし)

Takahiro Nishio, Toshu An, Atsushi Nomura, Kousuke Miyachi, Toyooki Eguchi, Hideaki Sakata, Shizeng Lin, Nobuhiko Hayashi, Noriyuki Nakai, Masahiko Machida, and Yukio Hasegawa "Superconducting Pb Island Nano-structures Studied by Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy" Physical Review Letters, 101, 167001 (2008). (査読有り)

長谷川幸雄・小野雅紀・西尾隆宏・江口豊明「局所表面ポテンシャル測定と遮蔽効果・フリーデル振動の観測」固体物理、

91 - 99 ページ、42 号、2007
(査読なし)

Y Hasegawa, M Ono, Y Nishigata, T Nishio, and T Eguchi "Real Space Observation of Screened Potential and Friedel Oscillation by Scanning Tunneling Spectroscopy" Journal of Physics Conference Series, 61 399-403 (2007). (査読有り)

[学会発表](計40件)

Yukio Hasegawa, "The screened potential and the Friedel oscillation observed by LT-STM", The 1st surface kinetics international conference, March 22, 2009, Salt Lake City (invited talk)

Yukio Hasegawa, "Spatial mapping of screened electrostatic potential and superconductivity by scanning tunneling microscopy/spectroscopy" Physics of Surface and Interface, February 26, 2009, Puri, India (invited talk)

Yukio Hasegawa "Vortex states in nano-size Pb island structures studied by LT-STM/STS", Surface Nanoscience Workshop, February 19, 2009, Seoul (invited talk)

長谷川幸雄「STS(走査トンネル分光)による表面電子状態分布計測」第7回メゾテクノロジーフォーラム 原子・ナノ・メゾにわたる表面・内部の電子・原子状態分布計測技術の最先端、つくば、平成20年2月29日(依頼講演・特別講演)

Yukio Hasegawa, "Real space Observation of Screened Potential and the Friedel oscillation by Scanning Tunneling Spectroscopy" International Conference on Nano Science and Technology (ICN+T 2007), Stockholm, July 4, 2007 (invited talk)

[図書](計1件)

長谷川幸雄、江口豊明、共立出版「走査プローブ顕微鏡」重川秀実、吉村雅満、河津 璋責任編集
1.基礎編-I 第3章 振動を扱うための基礎 61-66、2.基礎編-II 3-2-1項 原子間相互作用 112-123 (2009)

6.研究組織

(1)研究代表者

長谷川 幸雄 (Hasegawa Yukio)
東京大学・物性研究所・准教授
研究者番号: 80252493

(2)研究分担者

該当者なし

(3)連携研究者

江口 豊明 (Eguchi Toyoaki)
東京大学・物性研究所・助教
研究者番号: 70308196
浜田 雅之 (Hamada Masayuki)
東京大学・物性研究所・技術職員
研究者番号: 00396920

(4)研究協力者

安 東秀 (An Toshu)
東京大学・物性研究所・ISSPリサーチフェロー
西尾 隆宏 (Nishio Takahiro)
日本学術振興会・特別研究員
山崎 詩郎 (Yamazaki Shiro)
東京大学・物性研究所・特任研究員