

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25286055

研究課題名(和文) 走査トンネル顕微鏡による超伝導強磁性体界面での近接効果に関する研究

研究課題名(英文) Scanning tunneling microscopy on proximity effects at superconductor/ferromagnetic interfaces

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：常伝導金属を超伝導体に接触させると、超伝導ライクな性質が接触界面近傍に現れる。走査トンネル顕微鏡による局所トンネル分光の機能を生かして、誘起された超伝導特性およびその空間分布を評価し、欠陥構造や電子状態による影響を明らかにした。

2次元金属層における近接効果による研究では、原子層ステップ構造が超伝導特性に大いに影響を与えること見出された。超伝導の拡がりを遮断するとともに、ステップと界面間では増強させることが明らかとなった。

強磁性体との近接効果では、超伝導特性が界面近傍において破壊される逆近接効果が観察された。破壊の拡がりに異方向性が見出され、フェルミ面形状によるものと結論された。

研究成果の概要(英文)：When a normal metal is made contact with a superconductor, superconducting properties penetrate into the normal metal from the interface. Utilizing a function of local tunneling spectroscopy, we investigated the induced superconductivity by scanning tunneling microscopy, and revealed that local defective structures and electronic states affect the propagation of the proximate effect.

In studies of the proximity effect into two-dimensional normal metal layers, we found that the monoatomic steps in metal layers exhibit significant effects on the propagation of superconductivity. We revealed that the steps disrupt the propagation beyond them and enhance the superconductivity between the steps and the super/normal interface.

At an interface between a ferromagnetic metal and a superconductor, we observed breaking of superconductivity near the interface in the superconducting material, and found that the breaking is anisotropic reflecting the shape of the Fermi surface.

研究分野：理工系

キーワード：走査トンネル顕微鏡 近接効果 2次元超伝導 強磁性薄膜 ラシュバ効果

1. 研究開始当初の背景

超伝導の近接効果は、現象そのものは古くから知られており多くの研究がなされているテーマである。しかしながら、そのナノスケールでの性質となると、試料作製の制御性の問題等のために、必ずしも明確ではない点も多い。さらに強磁性体との近接効果では、振動的な超伝導特性の振る舞いや、トリプレット状態のクーパー対の形成等が期待されるものの、そのことを明確に示す実験結果は十分には得られていないのが現状である。

一方、表面研究の分野では、半導体基板に金属元素を単層蒸着することにより、2次元金属層や超伝導層が形成されることが明らかとなり、超伝導体との界面を形成することによって、走査トンネル顕微鏡 (STM) により、直接実空間で近接効果を研究できる状況が整ってきた経緯がある。そこで、本研究提案では、強磁性金属を含む2次元金属層と超伝導体である Pb との近接効果の実空間観察を行い、その特異な性質を探ることを目的として、研究を行った。

近年、量子コンピュータ等への展開を見据えて、マヨラナ束縛状態の構築が大きな注目を集めている。超伝導状態の準粒子は基本的にマヨラナ準粒子であり、近接効果はマヨラナ準粒子を注入する手段として、マヨラナ束縛状態の形成過程における重要な役割を担う。近接効果を如何に強めるか・制御するかは重要な課題であり、注目される研究テーマである。

2. 研究の目的

本研究提案では、2次元金属層と超伝導体との近接効果による超伝導特性の広がりを、STM による局所トンネル分光手法により直接計測することにより明らかにし、金属層中の欠陥構造や電子状態が与える影響について評価する。

また、金属層を強磁性体に置き換えた系での近接効果や、超伝導体側の超伝導特性が破壊される現象である逆近接効果、究極の接触としての超伝導体間の原子接触における電気伝導特性に関してナノスケール・原子スケールの精度で解明することを試みた。

3. 研究の方法

2次元金属層の作製は、Si 等の半導体基板に1原子層程度の金属元素を蒸着することによって行う。磁性薄膜は、Ge 基板に Mn を数原子層蒸着し加熱することで磁性体である Mn_5Ge_3 の薄膜を作製している。

これらの金属層上に Pb をさらに蒸着することによって Pb のアイランド状の構造を作製し、金属層界面近傍での超伝導ギャップ測定から、超伝導特性の評価を行っている。

超伝導特性評価の指標として、超伝導ギャップ深さに相当するゼロバイアス電圧での電気伝導度 (zero bias conductance; ZBC) の値を像として、視覚化することも行っている。

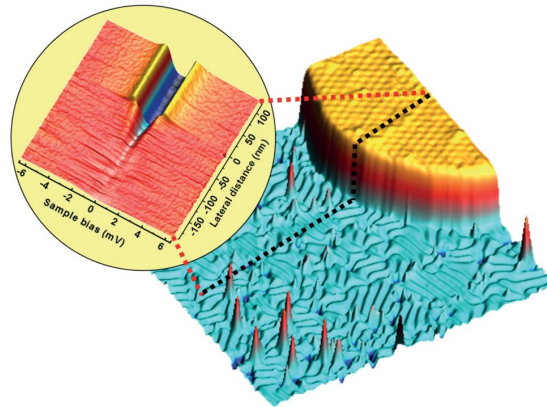


図1 近接効果測定の様式図。超伝導体 (黄色) から金属層 (水色) に超伝導特性が浸み出し、金属層上でもギャップが観察される (円内)。

4. 研究成果

(1) 2次元単原子層金属におけるステップの近接効果に対する影響

半導体基板の単原子層の金属元素からなる2次元金属層および金属的な電子状態にとり、基板の欠陥、例えば、ステップ構造は大きな障壁であり、電気伝導特性にも大いに影響を与えると予想される。しかしながら、その振る舞いを直接明らかにすることは、現在のナノテクノロジーを以ってしても用意ではない。ここでは、近接効果による超伝導特性の広がりがステップに対してどう影響を受けるかを、実空間観察を通して明らかに、さらにはその電気伝導特性に関する知見を得ている。

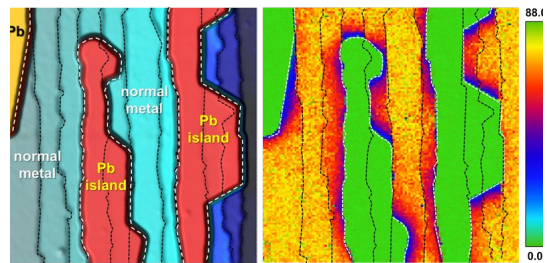


図2 Pb 誘起 2次元金属層 (SIC) と Pb アイランド構造。(左) STM 像 (右) ZBC 像

図2は、Pb 誘起 2次元金属層である SIC (striped incommensurate) 相上に、超伝導体である Pb アイランド構造が載っている試料の STM 像および ZBC 像である。ZBC 像では緑色の領域が最も超伝導が強い (ギャップが

深い)領域であり、Pb アイランド上がそれに対応している。Pb アイランドの周囲では、色が青 赤 黄色と変化しており、青から赤にかけての領域が、近接効果によりギャップが誘起されている領域を表わしている。

SIC 層上には、基板に由来する単原子層ステップが見られるが、ZBC 像で対応する箇所での超伝導特性を見ると、青あるいは赤から急激に黄色に変化している様子が見てとれる。これはステップにより近接効果の拡がり が遮断されていることを意味している。また、図中、左側中央にアイランド端とステップが接近している領域があるが、その領域でのギャップを見ると、他に比べ深くなっているおり、超伝導特性が増強されている様子が観察された。

ステップ近傍において観察されたこれらの性質は、ステップが2次元層内の金属電子状態に対して障壁として働いていると考えることで説明される。このことを示すために、準古典近似の元で超伝導特性を記述する方程式である Usadel 方程式を、ステップにおいて障壁による電気抵抗がある過程として解くと、実測された分布をうまく説明できることが判明した。さらに、このことから拡散領域における金属層のステップによる電気抵抗値を初めて実測することに成功している。

(2) ラッシュバ分裂した電子状態を持つ2次元金属層への近接効果

金属層の電子状態がラッシュバ分裂した系である場合、クーパ対を形成すると一重項と三重項の混合状態となることが予想される。Ga(111)基板上に約1原子層のPbを蒸着させた $\beta\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ Pb構造は、ラッシュバ分裂した状態を持つことから、この系に近接効果により超伝導特性を導入することにより、一重項と三重項の混合状態や振動的な超伝導特性の出現が期待される。

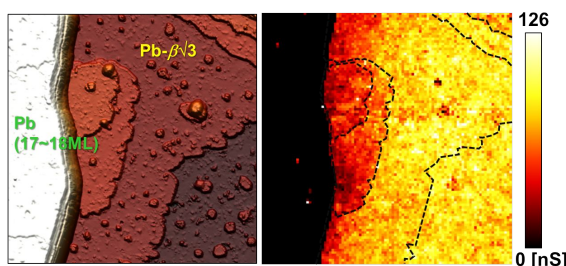


図3 超伝導体 Pb とラッシュバ分裂した電子状態を持つ Ge(111)- $\beta\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ Pb 構造の近接効果。(左) STM 像、(右) ZBC 像

図3に超伝導体である Pb アイランド構造とラッシュバ分裂した電子状態を持つ Ge(111)- $\beta\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ Pb 構造の界面近傍での STM

像と ZBC 像とを示す。ZBC 像では、期待された振動的超伝導特性は観察されず、さらに Si 基板で見られたステップの影響も顕著ではない。

詳細な理論研究や光電子分光による測定から、この系には表面下5~10層程度の深さに存在し表面でも振幅を持つ subsurface 状態と呼ばれる電子状態の存在が示唆されている。Rashba 分裂した表面電子状態ではなく、この subsurface 電子状態が近接効果に寄与することに、上記の現象が説明できると考えている。

(3) s波超伝導の逆近接効果による超伝導破壊に見られる異方性

超伝導特性は、磁場・磁性不純物の吸着・磁性体との逆近接効果により、破壊される。その際の常伝導領域の形状は、クーパ対の対称性に依存するとされており、実際、これまでも異方性のある常伝導領域の拡がり が、異方的な超伝導の対称性の証拠として、示されることがあった。本研究では、s波超伝導体である Pb を強磁性体である Mn_5Ge_3 に接触させた際に生じる逆近接効果において観察された異方性について議論する。

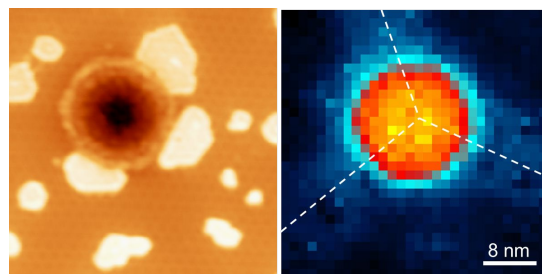


図4 超伝導体 Pb アイランド内に埋め込まれた強磁性体 Mn_5Ge_3 (左) STM 像。(右) ZBC 像。

図4に、強磁性体 Mn_5Ge_3 アイランド構造を埋め込んだ超伝導体 Pb アイランド構造の STM 像(左)と ZBC 像(右)を示す。中央部左の円形部分に、 Mn_5Ge_3 のアイランド構造が埋め込まれていると考えられ、ZBC 像では、超伝導がほぼ壊れた領域(赤色)として観察される。超伝導がほぼ壊れていることから、 Mn_5Ge_3 アイランドがその磁化を保っていることも推定される。

加えて、ZBC 像では、超伝導が弱められている領域が三方(点線方向)に広がっているのが見える。Pb アイランドは(111)面を最表面に持つ結晶であり、弱められる方向はその $[112-]$ 方向である。

Pb は s 波超伝導体であり超伝導体の対称性からは、異方性が現れることは期待できない。異方性を示すもう一つの可能性として、

フェルミ面の影響が挙げられる。磁性体との近接により超伝導が破壊されると、フェルミ速度を持つ準粒子が生成し、その方向に拡がりを持つ束縛準位が形成され、ギャップ内への状態密度に寄与する。Pbのフェルミ面には2つのバンドが関与しているが、点を囲む閉じたフェルミ面は(111)方向にファセット面を持っているので、その方向に拡がれば、(111)表面への投影として[112-]方向に拡がることとなる。埋め込まれた磁性体による超伝導破壊では、フェルミ面形状を反映した異方性が現れることを初めて明らかにすることができた。

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11件)

1. T. Tominaga, T. Sakamoto, H. Kim, T. Nishio, T. Eguchi and Y. Hasegawa, "Trapping and squeezing of vortices in voids directly observed by scanning tunneling microscopy and spectroscopy", Phys. Rev. B 87, 195434 (2013). 査読有
2. Shunsuke Yoshizawa, Howon Kim, Takuto Kawakami, Yuki Nagai, Tomonobu Nakayama, Xiao Hu, Yukio Hasegawa, Takashi Uchihashi, "Imaging Josephson vortices on the surface superconductor Si(111)-($\sqrt{7}\times\sqrt{3}$)-In using a scanning tunneling microscopy", Phys. Rev. Lett. 113, 247004 (2014). 査読有
3. T. Kawakami, Y. Nagai, X. Hu, S. Yoshizawa, H. Kim, T. Nakayama, Y. Hasegawa, T. Uchihashi, "Excitation spectrum of Josephson vortices on the surface superconductor" J. Phys.: Conf. Ser. (proceedings of LT27) 568, 022022 1-5 (2014). 査読有
4. Keiji Doi, Emi Minamitani, Shunji Yamamoto, Ryuichi Arafune, Yasuo Yoshida, Satoshi Watanabe, and Yukio Hasegawa, "Electronic and magnetic effects of a stacking fault in cobalt nanoscale islands on the Ag(111) surface", Phys. Rev. B 92, 064421 1-8 (2015). 査読有
5. Shunsuke Yoshizawa, Howon Kim, Yukio Hasegawa, and Takashi Uchihashi, "Disorder-induced suppression of superconductivity in the Si(111)-($\sqrt{7}\times\sqrt{3}$)-In surface: Scanning tunneling microscopy study", Phys. Rev. B 92, 041410 (R) 1-5 (2015). 査読有
6. Howon Kim and Yukio Hasegawa, "Site-dependent evolution of electrical conductance from tunneling to atomic point contact", Phys. Rev. Lett. 114, 206801 1-5 (2015). 査読有
7. Shunsuke Yoshizawa, Howon Kim, Takuto Kawakami, Yuki Nagai, Tomonobu Nakayama, Xiao Hu, Yukio Hasegawa, Takashi Uchihashi, "Impact of Surface Conditions on the Superconductivity of Si(111)-($\sqrt{7}\times\sqrt{3}$)-In", e-Journal of Surface Science and Nanotechnology, 13 151-154 (2015). 査読有
8. Shunji Yamamoto, Yasuo Yoshida, Hiroshi Imada, Yousoo Kim, and Yukio Hasegawa, "Direct visualization of surface phase of oxygen molecules physisorbed on Ag(111) surface: a two-dimensional quantum spin system", Phys. Rev. B 93, 081408 1-5 (R) (2016). 査読有
9. Howon Kim and Yukio Hasegawa, "Insensitivity of atomic point contact conductance to a moiré structure", Phys. Rev. B 93 075409 1-6 (2016). 査読有
10. Howon Kim, Yoshinori Miyata, and Yukio Hasegawa, "Superconducting proximity effect on Rashba-split Pb/Ge(111)- $\beta\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ surface", Supercond. Sci. Technol. accepted (2016). 査読有
11. Howon Kim and Yukio Hasegawa, "Spatial variation in local work function as an origin of moiré contrast in scanning tunneling microscopy images of Pb thin films/ Si(111)", Jpn. J. Appl. Phys. accepted (2016). 査読有

〔学会発表〕(計25件)

1. Howon Kim, Yuki Nagai, Takeo Kato, Yukio Hasegawa, "Anisotropic Suppression of Superconductivity on Pb(111)/Mn5Ge3/Ge(111)", APS March Meeting 2016, Baltimore, MD, USA, March 14–18 (2016).
2. Howon Kim, 長谷川幸雄「トンネルから原子点接触領域までの伝導チャネル形成過程の評価」日本物理学会 第71回年次大会(2016年) 宮城県仙台市、2016年3月19–22日
3. 河村光晶, Howon Kim, 長谷川幸雄, 加藤岳生, 尾崎泰助「Pb(111)表面における原子点接触領域での電気伝導の第一原理固有チャネル解析」日本物理学会 第71回年次大会(2016年) 宮城県仙台市、2016年3月19–22日
4. H. Kim and Y. Hasegawa, "Atomic-site dependence of point contact conductance", 23rd International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM23), Niseko, Hokkaido, Dec. 10-12, 2015 (invited).
5. Howon Kim and Yukio Hasegawa,

- "Atomic-site dependent point contact conductance", 表面・界面スペクトロスコピー2015、埼玉県嵐山町、2015年11月27-28日(招待講演)
6. Howon Kim, Y. Nagai, T. Kato and Y. Hasegawa, "Anisotropic Suppression of Superconductivity on Pb(111)/Mn₅Ge₃/Ge(111)", 15th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-15), Hiroshima, Nov. 15 – 20, 2015
 7. Yukio Hasegawa, "Superconducting proximity effects on Pb-induced reconstructed Si and Ge surfaces", APCTP (Asia Pacific Center for Theoretical Physics) workshop, "Impurity induced states and quasiparticle interference in unconventional superconductors and strong spin-orbit coupled systems", 18-23 October 2015, POSTECH, Pohang, Korea (invited)
 8. Howon Kim, 長谷川幸雄, 「トンネル領域から原子接触までの電気伝導度の原子サイト依存性」日本物理学会第70回年次大会(2015年)東京都新宿区、2015年3月
 9. 宮田佳典, Howon Kim, 長谷川幸雄 「走査トンネル顕微鏡によるPb/Ge(111)系の近接効果に関する研究」日本物理学会第70回年次大会(2015年)東京都新宿区、2015年3月
 10. 長谷川幸雄 「走査トンネル顕微鏡による表面・界面でのナノスケール超伝導特性評価」九州大学量子ナノスピン物性研究センター研究会「ナノ物理研究の最前線」2015年2月6日、福岡県福岡市(招待講演)
 11. H. Kim and Y. Hasegawa, "Site-specific Josephson Coupling between Two Superconductors at the Atomic Contacts" ICSPM22, Atagawa, Shizuoka, Dec. 11-13, 2015.
 12. 長谷川幸雄 「STM/AFM イメージングを超えて Beyond the STM/AFM imaging」日本物理学会2014年秋季大会、愛知県春日井市、2014年9月(依頼講演)
 13. Howon Kim, Y. Hasegawa, "Josephson Scanning Tunneling Spectroscopy at the Atomic Contacts", International Conference on Nanoscience+Technology (ICN+T), Vail, CO, USA, July 20-25, (2014)
 14. H. Kim, S.-Z. Lin, M.J. Graf, T. Kato, Y. Hasegawa, "Real-space observations of superconducting proximity effect by scanning tunneling microscopy and spectroscopy", International Workshop on Nanoscale Spectroscopy and Nanotechnology (NSS8), Chicago, IL, USA, July 28-31, 2014
 15. Yukio Hasegawa and Howon Kim "Roles of atomic-scale defects in the superconducting proximity effect visualized by STM", Multi-Condensate Superconductivity and Superfluidity in Solids and Ultracold Gases, June 24-27, 2014, Camerino, Italy (invited)
 16. Howon Kim and Yukio Hasegawa, "Enhancement and termination of the superconducting proximity effect due to atomic-scale defects visualized by STM", 3rd International Conference on Physics at Surfaces and Interfaces, Puri, India, February 24-28 (2014). (invited)
 17. H. Kim and Y. Hasegawa, "Josephson Spectroscopy at the Atomic Contacts", 12th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN) and 21st International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM), Tsukuba, Ibaraki, November 4 - 8, (2013) (poster)
 18. H. Kim and Y. Hasegawa, "Real-space Observation of Superconducting Proximity Effect by Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy", 12th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN) and 21st International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM), Tsukuba, Ibaraki, November 4 - 8, (2013).
 19. Howon Kim and Yukio Hasegawa, "Achieving Josephson spectroscopy at the atomic contacts"日本物理学会2013年秋季大会、徳島県徳島市、2013年9月
 20. Howon Kim and Yukio Hasegawa, "Proximity effect on the superconductor-normal metal hybrid nanostructures", 日本物理学会2013年秋季大会、徳島県徳島市、2013年9月
 21. Howon Kim and Yukio Hasegawa, "Proximity effect on the superconductor-normal metal hybrid nanostructures: Scanning tunneling microscopy and spectroscopy", International Vacuum Conference (IVC-19) and International Conference on Nanoscience and Technology (ICN+T 2013), Paris, France, September 2013
 22. Yukio Hasegawa and Howon Kim, "Real-space observation of superconducting proximity effect by scanning tunneling microscopy and spectroscopy", the 6th International Workshop on Surface Physics, Niemcza, Poland, September 2013 (invited)

23. Howon Kim and Yukio Hasegawa,
"Real-space observation of superconducting
proximity effect by scanning tunneling
microscopy and spectroscopy", Hayashi
Conference, Hayama, Kanagawa, July 2013.
(poster)
24. Howon Kim and Yukio Hasegawa,
"Proximity effect on the superconductor-
normal metal hybrid nanostructures", The
14th International Conference on Formation
of Semiconductor Interfaces", Gyeongju,
Korea, June-July, 2013
25. Yukio Hasegawa, "Real-space observation
of proximity effect by scanning tunneling
microscopy and spectroscopy",
Quantum in Complex Matter:
Superconductivity, Magnetism and
Ferroelectricity (SuperStripes 2013), Ischia,
Italy, May -June, 2013 (invited)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://hasegawa.issp.u-tokyo.ac.jp/>

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

なし

(3)連携研究者

吉田 靖雄 (YOSHIDA, Yasuo)

東京大学物性研究所助教

研究者番号：10589790

浜田 雅之 (HAMADA, Masayuki)

東京大学物性研究所技術専門職員

研究者番号：00396920