

原子層超伝導体に形成されるジョセフソン接合を発見

—原子スケール超伝導素子の実現に道—

独立行政法人 物質・材料研究機構
国立大学法人 東京大学物性研究所

概要

1. 独立行政法人物質・材料研究機構（理事長：潮田資勝）国際ナノアーキテクトニクス研究拠点（拠点長：青野正和）の吉澤俊介ポストドク研究員、内橋隆 MANA 研究者、中山知信主任研究者、川上拓人ポストドク研究員、古月暁主任研究者らのグループと、国立大学法人東京大学物性研究所の Kim Howon（キム・ホワン）ポストドク研究員、長谷川幸雄准教授らからなる研究チームは、シリコン表面上に形成した原子レベル厚さの超伝導体において、原子1個分の高さの段差（原子ステップ¹）が超伝導電流の流れを制御するジョセフソン接合²として働くことを発見しました。

2. 最近発見されたシリコン表面上の原子層超伝導体は、究極の微小サイズである原子スケール厚さの超伝導ナノデバイスを実現する可能性を秘めています。しかし、デバイス作製のためには、超伝導演算素子において不可欠な要素であるジョセフソン接合を作製する必要があり、その方法は未解決のままでした。

3. 今回、当研究チームは、走査トンネル顕微鏡³を用いた実験と微視的な理論計算によって、原子層超伝導体の原子ステップに超伝導量子渦⁴の一種であるジョセフソン量子渦⁵という特殊な超伝導状態が発生することを発見しました。これにより、原子ステップがジョセフソン接合として働くことを明らかにしました。本成果は、原子層超伝導体を用いると、従来の超伝導素子では個々に作製していたジョセフソン接合を自己組織化的に速く大量に作製できることも意味しています。

4. 今後、この成果を利用して、原子レベルの厚さしかないジョセフソン素子を創製し、超伝導デバイスへの応用を目指していきます。また、電力応用が期待される高温超伝導体では、ジョセフソン量子渦が重要な働きをすることが知られています。本成果は、高温超伝導体の超伝導特性の解明にも寄与すると期待されます。

5. 本研究は独立行政法人日本原子力研究開発機構の永井佑紀研究員との共同研究であり、文部科学省世界トップレベル研究拠点プログラムおよび科学研究費助成事業の一環として行われました。

6. 本研究成果は、米国物理学会 Physical Review Letters 誌に Editors' Suggestion（注目論文）として近日中に掲載される予定です。

研究の背景

近年、従来型のシリコン CMOS デバイスの微細化には限界が見えており、新しい原理で動作する電子デバイスの開発が急務となっています。超伝導演算素子は超高速・低消費電力情報処理を可能とするため、次世代の電子デバイスとして注目されています。このような超伝導素子を作製する上で最も基本的な構成要素となるのが、ジョセフソン接合です。ジョセフソン接合なしには、超伝導体はゼロ抵抗の伝導体に過ぎず、演算素子としての機能を発揮することはできません。また、ジョセフソン接合は他の様々な用途にも応用されています。すでに電圧標準への応用研究が進んでおり、最近ではジョセフソン接合列から、テラヘルツの電磁波を取り出すことにも成功しています。

その一方で、ごく最近にシリコン基板上に成長した金属原子層が超伝導状態になることが発見されました(参考: 物質・材料研究機構プレス発表、<http://www.nims.go.jp/news/press/2011/11/p201111020.html>)。一般にデバイスの高性能化には微細化が有効であることから、このような原子層超伝導体を利用することで、究極的な超伝導デバイスを開発できると期待されます。しかし、これまでデバイス作製に必須な要素であるジョセフソン接合を原子層超伝導体に対して作製する方法については未解決のままでした。

研究内容と成果

今回、当研究チームは、ジョセフソン接合が原子層超伝導体の中に原子ステップという形で自然に形成されることを発見しました(図1)。

まず研究チームは、東京大学物性研究所で開発された極低温走査トンネル顕微鏡を用いて、液体ヘリウム温度以下の極低温(約-272°C)でシリコン基板上に成長したインジウム原子層の超伝導体を観測しました。超伝導状態では低エネルギー領域で試料の電子状態密度が減ってエネルギーギャップが開いているため、走査トンネル顕微鏡を用いることで超伝導状態を同定することができます。このとき、磁場を試料に加えると、超伝導量子渦が発生していることが観測されました。ここでは渦の中心で超伝導状態が壊れて、その周りを超伝導電流が渦状に流れています。

さらに観測を進めると、試料表面の原子ステップ付近では、驚くべきことにこの超伝導量子渦状態に異常が生じていました(図2)。通常の渦状態は、等方的な円形をしています。原子ステップの付近では、ステップ方向に引き伸ばされた形をしています。また、渦の中心では超伝導が壊れているはずですが、原子ステップ付近の渦では超伝導状態がほとんど壊れずに残っていることがわかりました。

原子ステップを超伝導体の弱い結合箇所としてモデル化した微視的な理論計算と、実験結果を照らし合わせたところ、ステップ付近ではジョセフソン量子渦という特殊な状態が発生していることが明らかになりました(図3)。これは、原子ステップがジョセフソン接合として働くことを明瞭に示しています。また異なる原子ステップに対しては、ジョセフソン接合の強さが変化することもわかりました。これは、原子ステップ近傍で、原子層超伝導体がどのように成長したかに依存します。すなわち、試料の作製条件を調整することで、ジョセフソン接合の強さも制御することが可能となります。さらに原子ステップは試料内に自己組織化的に非常に多数形成されるので、原子層超伝導体を用いるとジョセフソン接合を速く大量に作製できることとなります。

今回発見された原子ステップでのジョセフソン接合を明らかにするには、高い試料作製技術と微視的なスケールでの実験・理論研究が必要となり、これまで困難でした。今回の成果は、原子層超伝導体に関する豊富な知見と、世界最高レベルの極低温走査トンネル顕微鏡、およびスーパーコンピュータを用いた新しい計算手法による理論解析が揃うことによって初めて可能となりました。

今後の展開

今後、この成果を利用して、原子レベルの厚さしかないジョセフソン素子を創製し、超伝導デバイスへの応用を目指していきます。そのためには、原子層超伝導体の成長を精密に制御することが重要な鍵となります。また、電力応用が期待される高温超伝導体では、隣接する二次元層の間に、今回の原子層物質とは異なった形でやはりジョセフソン接合ができていたことが知られています。高温超伝導体では、ジョセフソン量子渦が重要な働きをすることが知られていましたが、微視的な電子状態を直接観測することはできませんでした。本成果は、ジョセフソン量子渦の微視的電子状態を観測した最初の例であり、高温超伝導体の超伝導特性の解明にも寄与すると期待されます。

掲載論文

題目：Imaging Josephson vortices on the surface superconductor Si(111)-($\sqrt{7}\times\sqrt{3}$)-In using a scanning tunneling microscope

著者：Shunsuke Yoshizawa, Howon Kim, Takuto Kawakami, Yuki Nagai, Tomonobu Nakayama, Xiao Hu, Yukio Hasegawa, and Takashi Uchihashi,

雑誌：Physical Review Letters [Editors' Suggestion (注目論文)]

掲載日時：未定

用語解説

(1) 原子ステップ

試料表面に存在する原子レベルのステップ（段差）。試料表面には必ず存在し、テラス（平坦部分）と異なるため、一般に表面での特異な現象が起こりうる。

(2) ジョセフソン接合

二つの超伝導体が弱い結合によってつながれてできる構造。接合部は絶縁体（または常伝導体）であるにもかかわらず、超伝導電流が流れることができる。超伝導のもつ量子力学的な性質を最もよく表し、超伝導素子の作製にとって不可欠な要素である。

(3) 走査トンネル顕微鏡

先鋭な金属針を探針に用い、試料との間に流れるトンネル電流を検出することで動作する顕微鏡の一種。一般に原子分解能を有し、試料の電子状態を検出することも可能であるため、ナノテクノロジー研究において多用される。

(4) 超伝導量子渦

超伝導体に外部磁場を印加すると、第二種超伝導体では超伝導状態が完全に壊れる前に磁場は局所的に侵入する。その周りに渦状の超伝導電流が流れ、侵入した磁束の大きさは量子化される。この量子化された磁束を持つ超伝導渦のことを指す。

(5) ジョセフソン量子渦

ジョセフソン接合において発生する超伝導量子渦。通常の超伝導量子渦と異なった特異な性質をもつ。

本件に関するお問い合わせ先

（研究一般の内容に関すること）

独立行政法人 物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点ナノ機能集積グループ
MANA 研究者 内橋隆（うちはし たかし）

E-mail: UCHIHASHI.Takashi@nims.go.jp

TEL: 029-860-4150, FAX: 029-860-4793

（理論計算に関すること）

独立行政法人 物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点ナノ物性理論グループ
主任研究者 古月暁（ふるつき ぎょう）

E-mail: HU.Xiao@nims.go.jp

TEL: 029-860-4897

（実験装置に関すること）

国立大学法人 東京大学物性研究所 ナノスケール物性研究部門
准教授 長谷川幸雄（はせがわ ゆきお）

E-mail: hasegawa@issp.u-tokyo.ac.jp
TEL: 04-7136-3325, FAX: 04-7136-3326

(報道・広報に関すること)
独立行政法人 物質・材料研究機構 企画部門 広報室
〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1
TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017
E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp

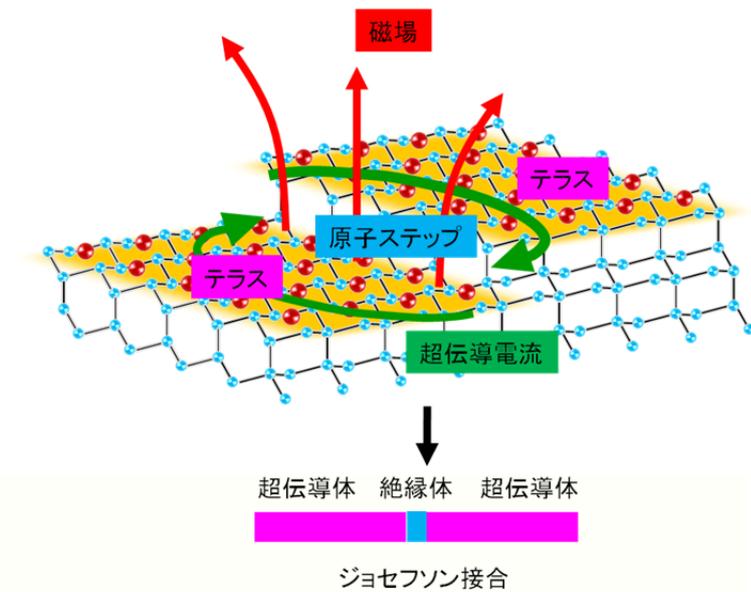


図1 原子層超伝導体と原子ステップの模式図。超伝導状態になったテラス（平坦領域）と原子ステップで、ジョセフソン接合を形成する。図は、磁場を加えると原子ステップにまたがって超伝導電流が渦状に流れ、ジョセフソン量子渦を形成することを示す。

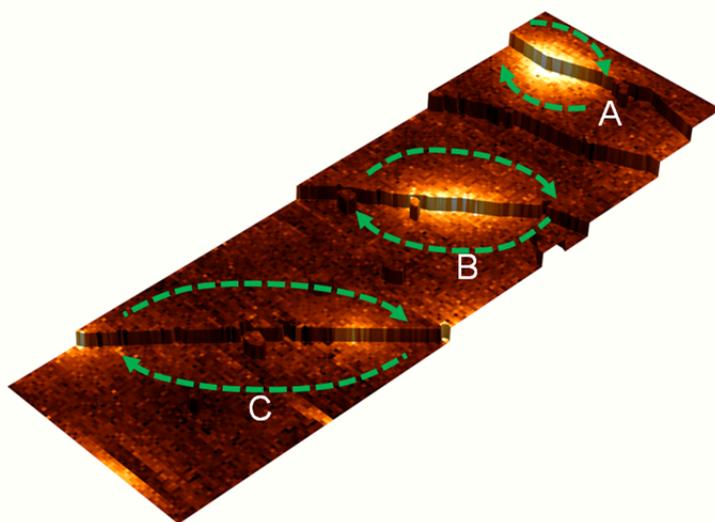


図2 走査トンネル顕微鏡で観察した原子層超伝導体の3次元表示。図の高度は試料の高度情報に、明るさは試料の局所電子状態密度にそれぞれ対応する。段差になっている原子ステップの近傍で明るくなっている領域に超伝導量子渦が存在している。A, B, Cの違いはジョセフソン接合の強さの変化に起因し、ステップ近傍でのインジウム原子層の隙間の幅の違いによって生じる。特にCはジョセフソン量子渦と同定される。矢印は、超伝導電流の流れを模式的に示し、ジョセフソン結合が弱くなるにつれて渦がステップ方向に伸張することを表す。

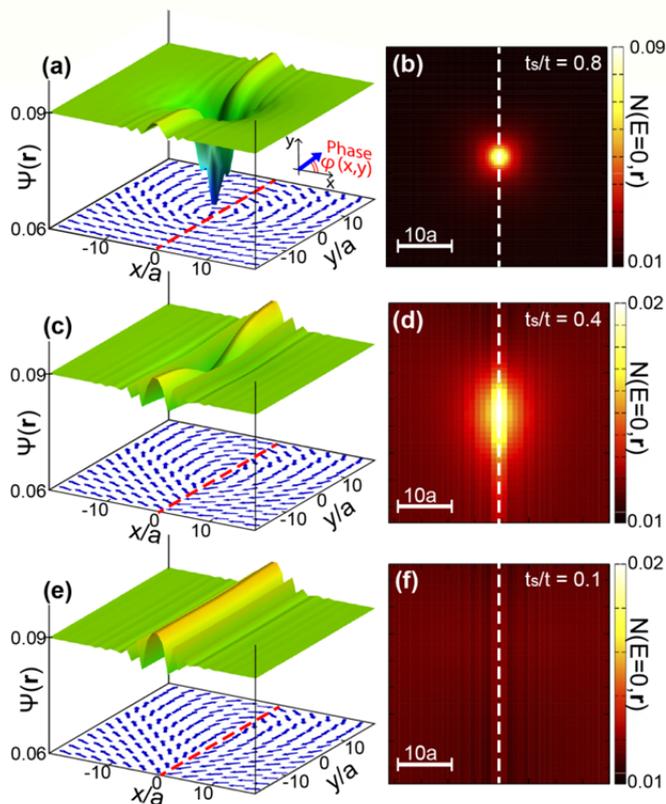


図3 微視的な理論によって得られた超伝導量子渦の計算結果。左は超伝導状態の秩序パラメータを、右はフェルミ準位での局所電子状態密度を表す。上から順にジョセフソン接合の強さが弱くなっており、図2のA, B, Cの変化に対応する。最も下の(d)(f)は、ジョセフソン量子渦と同定される。