

「極限環境状態における現象」

平成8年度採択研究代表者

山下 努

(東北大学未来科学技術共同研究センター教授)

## 「銅酸化物超伝導体単結晶を用いる超高速集積デバイス」

### 1. 研究実施の概要

単結晶固有ジョセフソン素子を実現するために、単結晶素子の寸法を小さくする努力を続けてきた。その結果、針状単結晶にFIB(集束イオンビーム)加工を行い、サブミクロン単結晶素子を世界で初めて作成した。図1は、素子の2次電子顕微鏡写真である。

今回、素子の面積を小さくして $1\mu\text{m}^2$ 程度にすると、固有ジョセフソン効果のほかに新しく、超伝導単電子トンネル現象が起こることが明らかになった。単電子トンネル現象は、電子が1個ずつトンネルする現象で、電子1個を制御する極小電子素子を実現するための基本となる現象である。

図2はその一例で、素子の電流 $I$ と電圧 $V$ 特性である。原点近くに約 $300\mu\text{V}$ の間隔をもつ5つのスパイク状の電圧周期構造が明瞭に見られる。このスパイク状電圧が単電子トンネル素子の特徴で、最初のスパイクは超伝導電子1個がトンネルする時に対応し、次のスパイクは2個のトンネルを示す。

単電子トンネル効果は、これまで金属や半導体で観測されているが、面積がサブ $\mu\text{m}^2$ 程度では $10\text{mK}$ 程度の極低温が必要であった。ところが、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ 単結晶素子は、その静電容量が接合の層の数に逆比例して小さくなり、単電子トンネルを起こすための帯電エネルギーが積層の数の増加と共に大きくなるという特徴がある。このため、積層の数が50くらいで、帯電エネルギーが熱雑音エネルギー $k_B T$ より大きくなり、液体ヘリウム温度の $4\text{K}$ で単電子トンネル効果が起こることが分かった。

単電子トンネル効果を基礎とする電子素子は、現在の半導体素子を極小にした場合の究極の素子として、その実現を目指し多くの研究が行われている。例えば、現在の半導体メモリー1個の記憶する電子の数は約10万個であるが、これを数個にすれば寸法と消費電力が激減することが期待できる。今回の実験結果は、超伝導単結晶素子がサブ $\mu\text{m}^2$ の大きなサイズで、しかも $4\text{K}$ という高温で動作する単電子素子を実現できることを示したもので、大集積回路用の超伝導単結晶単電子トランジスタやメモリーの実現が期待される。

下記の図は別紙(1)参照

図1：高温超伝導体単結晶ファイバーをFIB（集束イオンビーム）加工した立方体トンネル接合（中心部分のカギ形の部分）

図2：単電子トンネル接合のI-V特性

## 2. 研究実施内容

### 1. 固有ジョセフソン効果とその応用

超伝導エレクトロニクスの基本素子は、ジョセフソン接合であるが、高温超伝導体を用いるトンネル型接合は作成に成功した例がない。ところが最近、酸化物超伝導体の層状構造そのものが、ジョセフソン接合の積層構造を形成していることが明らかになりつつある。その一例としては、ピスマス系単結晶のI-V特性に観測された固有ジョセフソン効果である。この単結晶の層に直角方向の電流Iと電圧Vの特性が直列ジョセフソン・トンネル接合のそれと類似した性質を示す。また、ピスマス系材料は数GHz帯での電波吸収が観測され、これはジョセフソン・プラズマ励起と考えられている。もう一つの現象は $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 単結晶に観測されたTHz帯のプラズマ・エッジの観測と、その解釈である。これらの研究によれば、単結晶中に層に直角方向の電界成分をもつプラズマ周波数 $\omega_p \cong 5\text{THz}$ の電磁波は層面を伝播する。この材料のプラズマ励起現象は、従来のNb系ジョセフソン・トンネル接合のプラズマ励起現象と同じである。ただしNb系の場合、そのプラズマ周波数 $\omega_j$ は約50GHzである。従って、La系銅酸化物単結晶のプラズマ周波数は、従来のNb系ジョセフソン・プラズマ周波数より2桁高い。ジョセフソン・プラズマ周波数は、ジョセフソン・デバイスの動作周波数を決める特性量である。このことからLa系銅酸化物単結晶の固有ジョセフソン効果を従来のNb系ジョセフソン・デバイスの代わりに用いることができるならば、その性能は2桁向上することが期待できる。La系銅酸化物単結晶の固有ジョセフソン効果と、Nb系ジョセフソン接合の諸特性を比較したものが表1である。磁束量子の大きさは、スイッチング・デバイスやメモリセルの大きさを決める値であるが、単結晶の磁束量子のサイズは接合よりも2桁小さい。また、動作速度を決めるプラズマ周波数 $\omega_p \cong 5\text{THz}$ もジョセフソン接合の値 $\omega_j \cong 50\text{GHz}$ よりも2桁大きい利点もある。

表1のジョセフソン接合の $\lambda_j$ に対応する単結晶の $\lambda_j$ は約約 $1\mu\text{m}$ と小さな値を持っている。したがって、図1のようなジョセフソン・デバイスと同じような原理のデバイスを単結晶で作ると、約約 $1\mu\text{m}$ のデバイスが可能となる。この単結晶デバイスの最小サイズは約 $0.2\mu\text{m}^2$ となり、高速かつ小型のCMOSデバイスと同じか、それよりも小さく、メモリなどの高密度集積回路が実現可能となる。

## 2. 微小単結晶接合の超伝導単電子トンネル現象

我々は、単結晶固有ジョセフソン素子を実現するために、単結晶素子の寸法を小さくする努力を続けてきた。その結果、針状単結晶に FIB（集束イオンビーム）加工を行い、サブミクロン単結晶素子を世界で初めて作成した。図 2 (a)は、素子の 2 次電子顕微鏡写真、(b)は作成した素子の模式図である。

今回、素子の面積を小さくして 1 ミクロン平方程度にすると、固有ジョセフソン効果の他に全く新しく、超伝導単電子トンネル現象が起こることが明らかになった。単電子トンネル現象は、電子が 1 個ずつトンネルする現象で、電子 1 個を制御する極小電子素子を実現するための基本となる現象である。

図 3 はその一例で、素子の電流  $I$  と電圧  $V$  特性である。原点近くに約  $300 \mu\text{V}$  の間隔をもつ 5 つのスパイク状の電圧周期構造が明瞭に見られる。このスパイク状電圧が単電子トンネル素子の特徴で、最初のスパイクは超伝導電子 1 個がトンネルする時に対応し、次のスパイクは 2 個のトンネルを示す。

単電子トンネル効果は、これまで金属や半導体で観測されているが、面積がサブ  $\mu\text{m}^2$  程度では 10mK 程度の極低温が必要であった。ところが  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  単結晶素子は、その静電容量が接合の層の数に逆比例して小さくなり、単電子トンネルをおこすための帯電エネルギーが積層の数の増加と共に大きくなるという特徴がある。このため、積層の数が 50 くらいで、帯電エネルギーが熱雑音エネルギー  $k_B T$  より大きくなり、液体ヘリウム温度の 4K で単電子トンネル効果がおこることがわかった。

単電子トンネルの起こるためには、もう一つ条件がある。それは、接合の抵抗が量子抵抗  $R_0 = h/4e^2 = 6.4\text{K}\Omega$  より大となり、トンネルした電子が量子ゆらぎによって、元に戻らないことである。 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  単結晶は、その比抵抗が他の材料に比して大きいために、この条件が満足されていることもわかった。

単電子トンネル効果を基礎とする電子素子は、現在の半導体素子を極小にした場合の究極の素子として、その実現を目指し多くの研究が行われている。例えば、現在の半導体メモリー 1 個の記憶する電子の数は約 10 万個であるが、これを数個にすれば寸法と消費電力が激減することが期待できる。今回の実験結果は、超伝導単結晶素子電子素子がサブ  $\mu\text{m}^2$  の大きなサイズで、しかも 4K という高温で動作する超伝導単電子素子が実現できることを示したものである。大集積回路用の超伝導単結晶単電子トランジスタやメモリーの実現が期待される。

## 3. まとめ

銅酸化物超伝導体単結晶は、導電層と非導電層が交互に積層した結晶構造をもち、各層間が固有ジョセフソン結合をしていることが解ってきた。ここでは  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  単結晶の固有ジョセフソン効果を用いた、新しい単結晶スイッチ素

子などのデバイスの提案をし、この新しい単結晶エレクトロニクス素子は、従来のジョセフソン接合よりも 1/100 程度に小型化ができ、スイッチ速度も 100 倍速く、動作周波数は数 THz と期待できることを示した。我々は、このような単結晶素子を作る新しい FIB 加工技術を開発し、高温超伝導単結晶を用いて液体ヘリウム温度（マイナス 269 度）で作動する単電子トンネル素子を実現した。Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub> 針状単結晶に FIB（集束イオンビーム）加工を行いサブミクロン単結晶素子を作成し、この素子面積を 1 ミクロン平方程度にすると、電子が 1 個ずつ通過する超伝導単電子トンネル現象が起こることが明らかになった。さらに、単結晶の積層数を 1000 位にすると、77K くらいで動作する超伝導単電子素子を実現できると予想される。半導体デバイスや Nb 系ジョセフソン素子では到達できない高性能電子デバイスの開発が可能となるだろう。

下記の図は別紙(2)参照

図 1 銅酸化物超伝導単結晶素子構造

図 2

(A)集束イオンビーム加工法によって作成された 4 個の BSCCO 単結晶接合最大は 1μm×0.6μm 最小は 0.5μm×0.3μm

(B)単結晶接合の模式図

図 3 単結晶接合の I-V 特性

	銅酸化物単結晶	ジョセフソン・トンネル接合
動作温度を決める プラズマ周波数	$\omega_p \approx 5\text{THz}$	$\omega_J \approx 50\text{GHz}$
素子の大きさを決める 磁界侵入長	$\lambda_c \leq 1\mu\text{m}$	$\lambda_J \approx 100\mu\text{m}$
磁束量子の大きさ	$2\lambda_{ab} \cdot 2\lambda_c \approx 0.2\mu\text{m}^2$	$2\lambda \cdot 2\lambda \approx 20\mu\text{m}^2$

表 1 銅酸化物単結晶とジョセフソン・トンネル接合の比較

各数値は La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub> の値である。

### 3. 主な研究成果の発表（論文発表）

○Fluxon lattice oscillations in layered superconductors

S.E.Shafranjuk, M.tachiki, T.yamashita

Phys. Rev. B, Vol.57, No.21, pp.13765-13772, 1998

○ Elliptic function formalism description of anisotropic ginzburg-landau equation

- Cristina Buzea, Tsutomu Yamashita  
 Physica C298, pp.133-139, 1998
- AC currents in a vortex state of layered superconductors  
 S.E.Shafranjug, M.Tachiki, T.Yamashita  
 Phys.Rev.B, Vol.57, No.1, pp.582-589, 1998
- Giant flux quantization in layered superconductors  
 S.E.Shafranjug, and T.Yamashita  
 Phys.Rev.B., Vol.58, No.1, pp.121-124, 1998
- Enhanced AC Josephson Effect in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$  junctions Driven by Two RF Sources  
 C.Koster, J.Chen, H.Myoren, K.Nakajima, T.Yamashita, and A.Takata  
 Jpn. J.Appl.Phys. Vol.37, pp.4356-4357, 1998
- Phase-Mode Circuits for High-Performance Logic  
 T.Onomi, Y.Mizugaki, H.Satoh, T.Yamashita, and K.Nakajima  
 IEICE Trans. Electron., Vol.E81-C, No.10, 1998
- Effects of Grain Boundaries on Temperature Dependence of Microwave Surface Resistance of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  Thin Films  
 M.Ben.Tunyiswa, K.Nakajima, J.Chen, S.-J.Kim, H.Wang, and T.Yamashita  
 Jpn.J.Appl.Phys.Vol.37, No.10, pp.5540-5543, 1998
- High-Tc Ramp-Type Josephson Junctions on MgO Substrates for Terahertz Applications  
 H.Myoren, M.A.J.Verhoeven, J.Chen, K.Nakajima, T.Yamashita, D.H.A.Blank, and H.Rogalla  
 IEEE, Trans. on Appl. Suprecond, Vol.8, No.3, 1998
- Electron-Beam-Damaged  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$  Josephson junctions for High-Frequency Device Applications  
 S.-J.Kim, and T.Yamashita  
 IEICE Trans. Electron., Vol.E81-C, No.10, pp1544-1548, 1998
- Intrinsic Josephson effect in  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  mesa junctions with niobium counter electrode  
 Y.Uematsu, K.Nakajima and T.Yamashita  
 Appl. Phys. Let, Vol.73, No.19, pp.2820-2822, 1998
- Numerical Evaluation for the High-Frequency Response of Josephson Junctions Having Finite Capacitance  
 Y.Mizugaki, K.Nakajima, J.Chen, and T.Yamashita

Jpn. J. Appl. Phys., Vol.37, No.11, pp.5971-5972, 1998

○ Response Properties at 2.525 Terahertz using High-Tc Josephson Junction on Silicon Bicrystal Substrates

J.Chen, E.Kobayashi, K.Nakajima, T.Yamashita, S.Linzen, F.Schmidl and P.Seidel

IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol.8, No.3, pp.132-136, 1998

○ Submillimeter wave detection and mixing experiments using high temperature Josephson junctions

J.Chen, E.Kobayashi, H.Myoren, K.Nakajima, T.Yamashita, S.Linzen, F.Schmidl and P.Seidel

SPIE Proc., 1998

○ mm and sub-mm Properties of Ramp-Type Josephson Junctions on MgO with STO Buffer Layers

H.Myoren, J.Chen, T.Yamashita, L.Amatuni, A.H.Sonnenberg, G.J.Gerritsma and H.Rogalla

'98 ASC, Palm Desert California, USA, 1998

他 3 件