

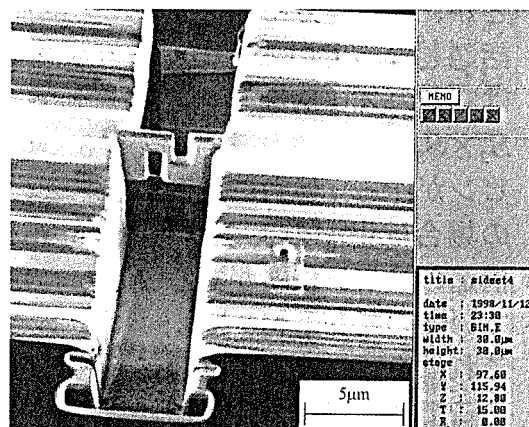
銅酸化物超伝導体単結晶を用いる超高速集積デバイス —ミリ波サブミリ波発光と超伝導単電子対トンネル効果—



RIEC

山下 努
東北大学 未来科学技術共同研究センター
教授

高温超伝導物質の単結晶を集束イオンビームで加工し、世界で初めて $1\mu\text{m}^2$ 以下の接合面を持つ単結晶素子を開発した。ミリ波サブミリ波帯発光超伝導レーザーが可能であることを確認。さらにサブ μm^2 の素子の接合面を通過する電子を一個ずつ制御できる上、実用可能な液体ヘリウム（絶対温度 $4\text{K} = -269^\circ\text{C}$ ）温度で作動する単電子対トンネル効果を発見した。



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）加工した立体形トンネル接合（中心部分のカギ形の部分）

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った。その一例としては、ビスマス系単結晶の 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、ビスマス系材料は数 GHz 帯での電波吸収が観測され、これがジョセフソン・プラズマ励起であることが確かめられた。これらの研究によれば、単結晶中を層に直角方向の電界成分をもつ数 THz のジョセフソンプラズマと呼ばれる電磁波が層面を伝播する。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。プラズマ周波数は、デバイスの動作周波数を決める特性量であるから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。

表 1 のジョセフソン接合の λ_J に対応する単結晶の λ_C は約 $1\mu\text{m}$ と小さな値を持つ

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 $1\mu\text{m}$ 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だろう。

	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 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の値である。

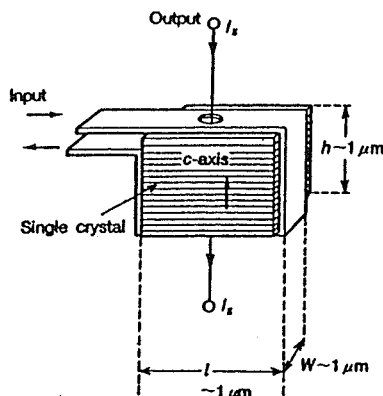


図1 銅酸化物超伝導単結晶素子構造

2. 単結晶接合の THz 波励振と超伝導単電子対トンネル現象

我々は、単結晶により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（ホイスカー）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。

欠陥の極めて少ない $10\mu\text{m}^2$ 程の Bi2212 単結晶メサ接合に層に平行な磁界を印加して、磁束量子列を内部に発生させ、これを電流によるローレンツ力で加速した場合、磁束量子列は層内を電磁波の速度まで加速される。そこで Bi2212 結晶に1ステラ程の磁界 B を層に平行に加えると単結晶内に磁束量子列が導入される。このとき層に垂直に電流 I を流すと、磁束量子はローレンツ力によって駆動され、高速で運動することが判った（図3）。高速な磁束量子列の運動はプラズマを励起

するからこれをミリ波サブミリ波帯のコヒーレントな電磁波源として応用できる。磁束流速度が図3に示すように $10^5 \sim 10^6$ m/s 程の高速になることがこれまでの研究で明らかになり、この現象を用いた THz 帯発光素子の実現をめざしている。

現在、情報通信に使われている周波数は $10 \sim 100$ GHz である。近い将来の IT では情報量の増加と共に使用周波数の1桁以上の向上が不可欠である。将来の情報社会において期待される超伝導ミリ波サブミリ波発光素子は、大きな役割が期待される。

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他に全く新しく、超伝導単電子対トンネル現象が起こることが明らかになった。単電子対トンネル現象は、電子対が1個ずつトンネルする現象で、電子対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4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対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。

単電子対トンネル効果は、これまで金属や半導体で観測されているが、面積がサブ μm^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、単電子対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。

単電子対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、超伝導単結晶電子素子がサブ μm^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対素子を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対トランジスタやメモリーの実現が期待される。

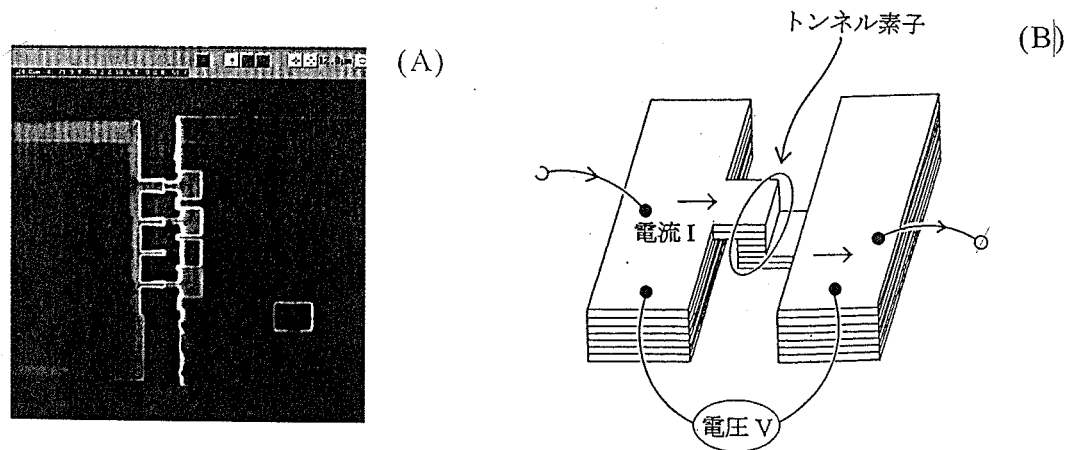


図2 (A)集束イオンビーム加工法によって作成された4個のBSCCO単結晶接合最大は $1 \mu\text{m} \times 0.6 \mu\text{m}$ 最小は $0.5 \mu\text{m} \times 0.3 \mu\text{m}$ (B)単結晶接合の模式図

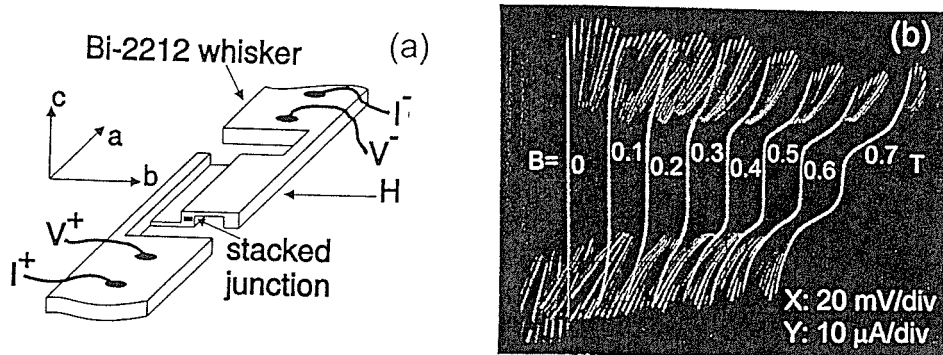


図3 磁束量子運動による固有ジョセフソン接合(a)のI-V特性(b)。Bi2212固有ジョセフソン接合の磁場下の電流電圧特性にみられる発振現象

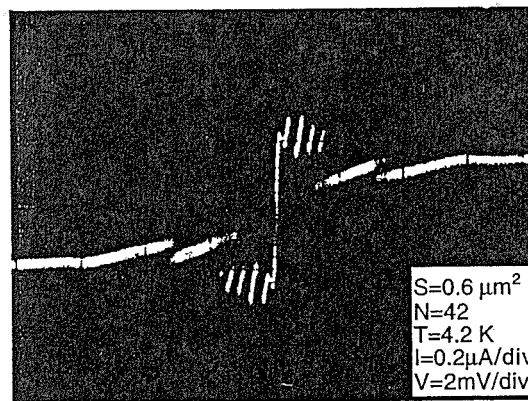


図4 単結晶接合のI-V特性に表われた単電子対トンネル効果

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。ここでは単結晶の固有ジョセフソン効果を用いた、新しい単結晶素子などのデバイスの提案をした。この新しい単結晶素子は、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となったことを確かめ、ミリ波サブミリ波発光の可能なことを示した。

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）で作動する単電子対トンネル素子を実現した。この素子面積を $1\mu\text{m}^2$ 程度にすると、電子対が1個ずつ通過する超伝導単電子対トンネル現象が起こることが明らかになった。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速な省電力集積電子デバイスの開発が可能となるだろう。