

固有ジョセフソン効果

未来科学技術共同研究センター 山下 努 (tyama@riec.tohoku.ac.jp)

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(Bi)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、Bi系材料は数十GHz以上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 ($\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$) 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・デバイスやメモリー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 $1\mu\text{m}$ 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、メモリーなどの高密度集積回路が実現可能となるだろう。

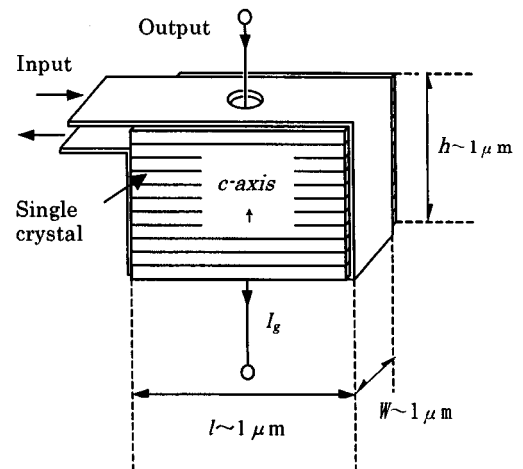


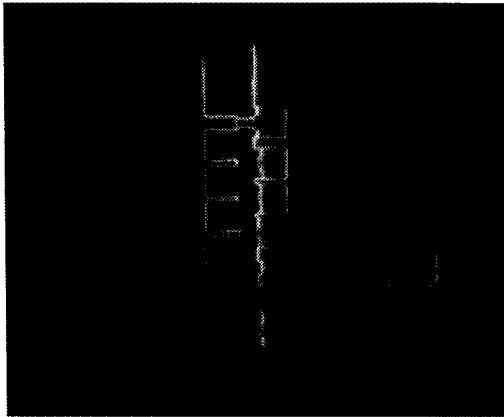
図1 銅酸化物超伝導単結晶素子構造

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

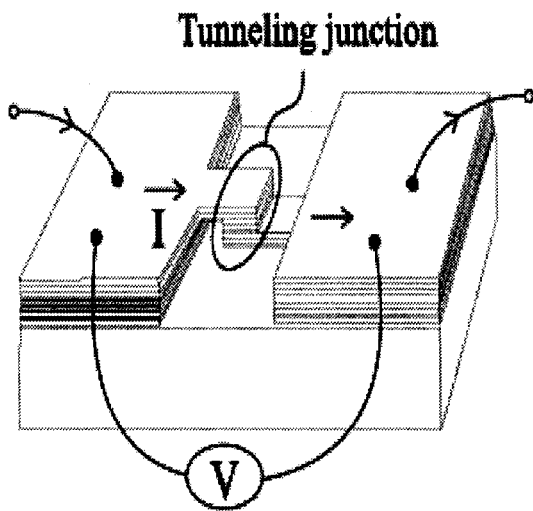
	銅酸化物単結晶	ジョセフソン・トンネル接合
動作周波数を決める プラズマ周波数	$\omega_p \cong 5\text{THz}$	$\omega_j \cong 500\text{GHz}$
素子の大きさを決める 磁界侵入長	$\lambda_c \leq 1\mu\text{m}$	$\lambda_j = 100\mu\text{m}$
磁束量子の大きさ	$2\lambda_{ab} \cdot 2\lambda_c \cong 0.2\mu\text{m}^2$	$2\lambda_j \cdot 2\lambda \cong 20\mu\text{m}^2$

2. 単結晶接合の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。



(A)



(B)

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Bi系単結晶接合(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

欠陥の極めて少ない $10\mu\text{m}^2$ 程のBi系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Bi系結晶に1テスラ程の磁界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。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 THz 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 $10^5\sim 10^6\text{m/s}$ 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 波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10GHz帯である。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THz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。

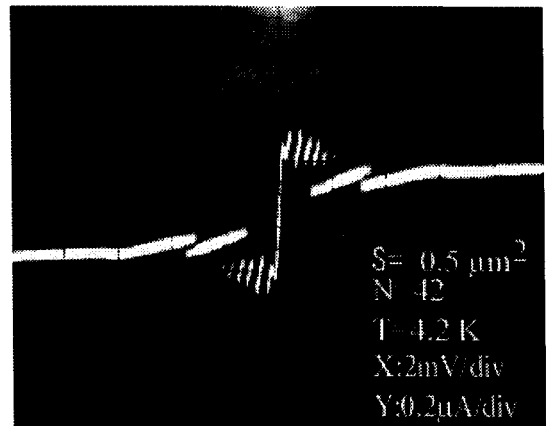


図3 小さな単結晶接合の I - V 特性

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[1]。

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 Bi 系単結晶素子は、その静電容量が接合の層の数の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 で単電子対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ーやメモリーの実現が期待される。

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、THz 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。

3. 固有ジョセフソン接合集積回路と THz デバイス

3-1. 固有ジョセフソン接合 (IJJ) の両側加工プロセスの開発

我々は最近、図 4 に示すような新しい両側加工プロセスを開発した[2]。このプロセスで作る IJJ の特徴は、

- 1) 単結晶内部に作られるため、図 5 に示すように臨界電流 (I_c) は均一となり、
- 2) 2次元回路が作成できるため、図 6 に示すようにアンテナや rf チョーク回路と集積できる。

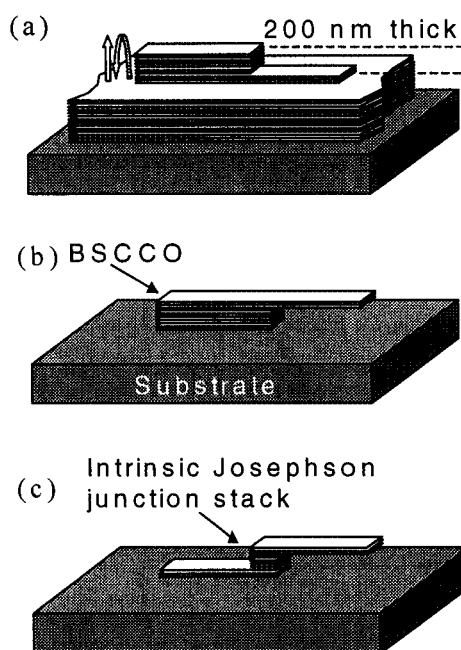


図4 新しい IJJ 両面加工プロセス

図 5 では接合数は 18 個である。この接合に THz 波を基板側から照射すると明確なシャピロステップが観測できる (図 7) [3]。この図で照射周波数 $f_{FIR} = 1.6\text{THz}$ に対応するジョセフソン電圧 $V = \Phi_0 f_{FIR} N = 3.4 \times N\text{mV}$ が発生している。ここで N は接合数である。図は明確なゼロクロス電圧が見られる。これは IJJ と THz 波の結合が極めてよいことを示してある。この結果は精密電子計測に必要な量子電圧標準装置や THz 波検出器実現の可能性を示している。

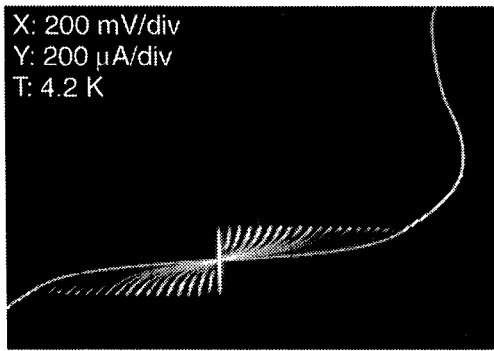


図5 均一な I_c を持つ両面加工した IJJ

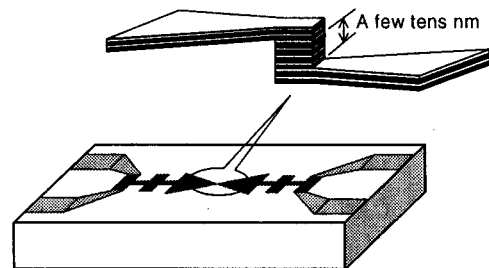
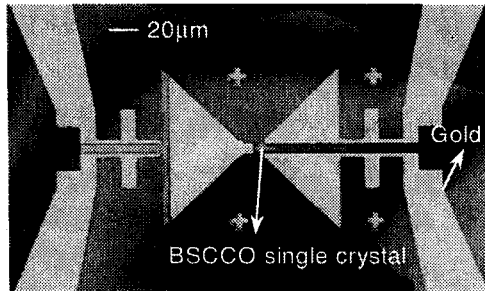


図6 アンテナ、rf チョークとともに集積された IJJ

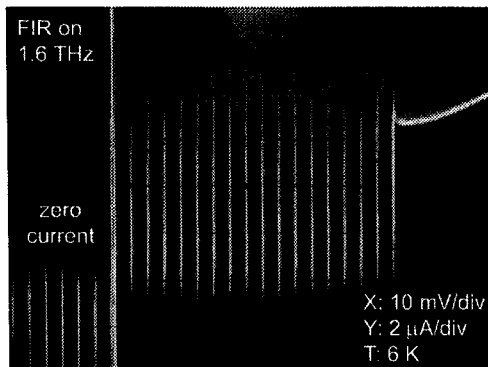


図7 基板側から 1.6THz の電磁波をあてたときの I - V 特性

3-2. IJJ アレー-THz レーザー

我々は Bi 系単結晶を用いて固有ジョセフソン接合集積回路技術を用いて図8に示すような接合アレーを作成した。似たような構造で 144 個の Nb 系接合アレーからなるデバイスは、その I - V 特性を測定した所、鋭い共振特性を示した[4]。この鋭い共振特性は、180GHz 帯のレーザー発振していることを示していることが、検波実験により明らかになった。また、連続波発振でその出力は

約 $0.2 \mu W$ ($10^{-4} W/cm^2$) であった。

このアレーレーザー技術より高温超伝導体 IJJ を用いて作成すれば連続波 THz 帯レーザーが実現できる。出力電力は約 $2mW$ ($20 W/cm^2$) と概算される。

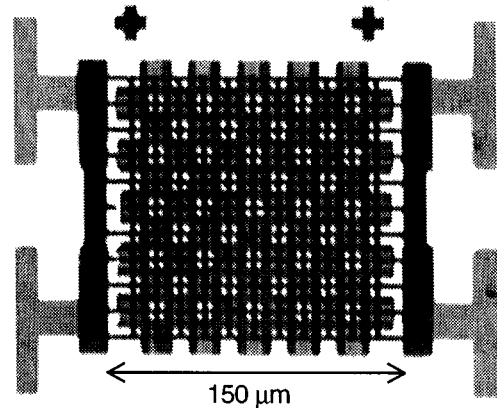


図8 Bi 系単結晶による固有ジョセフソン接合アレー

3-3. 結言

単結晶素子を二次元アレーに並べる集積回路プロセスを開発した。THz 帯のアンテナとチョーク回路に集積された 10,000 個以上単結晶素子アレーが作成され、その結果、THz 波を高感度に受信できることを確認、直流電流を注入すると超伝導 THz 波レーザーとなることが予測される。

現在の情報通信技術は 10GHz 帯までを使っているが、将来の情報量の増大に対応するためには、使用周波数帯の増大が必要である。現在使用中の周波数の 100 倍が THz 波であるが、この領域は発信器、伝送路、受信器等の基本素子が開発されていないため、未開拓周波数帯域となっている。超伝導単結晶接合集積回路技術により、THz 波用の連続波レーザー発振器と高感度受信器実現の可能性がでてきている。

参考文献

- [1] S.J. Kim, et al., Appl. Phys. Lett., **74** (1999) 1156.
- [2] H.B. Wang, et al., Appl. Phys. Lett., **78** (2001) 4010.
- [3] H.B. Wang, et al., Phys. Rev. Lett., **87** (2001) 107002.
- [4] B. Vasili, et al., Appl. Phys. Lett., **78** (2001) 1137.