

「高温超伝導単結晶集積回路とテラヘルツデバイスの開発」

—その応用に向けて—

東北大学 電気通信研究所 王 華兵

東北大学電気通信研究所山下研究室では、高温超伝導固有ジョセフソン接合（IJJ）¹の新しい作製プロセスを開発し、単結晶片からIJJの1次元、2次元、3次元アレーを作製することにより100,000以上の接合を形成させることに成功した。作製したIJJにテラヘルツ電磁波を照射することにより2.5 Vまでの量子化定電圧ステップを観測した。これは、高温量子電圧標準、テラヘルツCW発振器、電波天文等に関わる高温超伝導体の実用化に向けて、重要なステップに位置付けられる。

1. 背景

1992年にKleinerらは高温超伝導体に内在する固有ジョセフソン効果を発見した。Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+x}（BSCCO, 図1）の場合、ジョセフソン接合は、原子スケールの層状構造（1つの接合あたり1.5nm, 1nm=1/1,000,000,000m）に対応し、（低温超伝導体と比べて）高いエネルギーギャップを有しているため、テラヘルツ（1THz=1,000,000,000,000Hz）帯における高周波エレクトロニクスへの応用が期待されてきた。しかしながら、実用的な応用と理論的な理解に至るまでには少なくとも3つの問題があった。1つは、ジョセフソン接合をその特性を変えることなく単結晶中からどのようにして取り出せるかであり、もう1つは、全てが超伝導体で構成された回路をどのようにして作製するかである。そして、3つ目の問題は、固有ジョセフソン効果を反映した高周波応答が確認されなければならないということである。

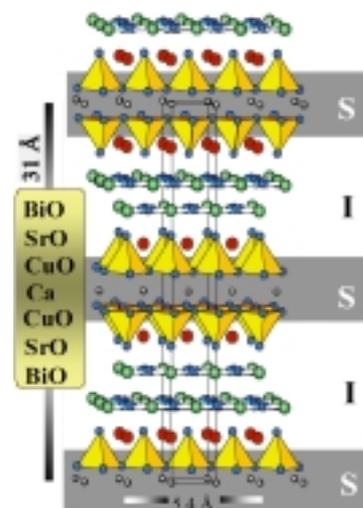


図1 Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+x} 単結晶の結晶構造 (S: 超伝導層, I: 絶縁層)

2. 研究の成果

(1) 我々はBi₂Sr₂CaCu₂O_{8+x}単結晶の内部から固有ジョセフソン接合を作製する新しいプロセス（両面加工法と呼ばれる）を開発した（図2）。これにより、単結晶の内部から接合が抽出されるため、均一な特性、まさに結晶固有の性質を引き出すことができる。このプロセスは、固有ジョセフソン効果に関する研究に従事している世界中の機関で適用され、現在も広まり続けている。

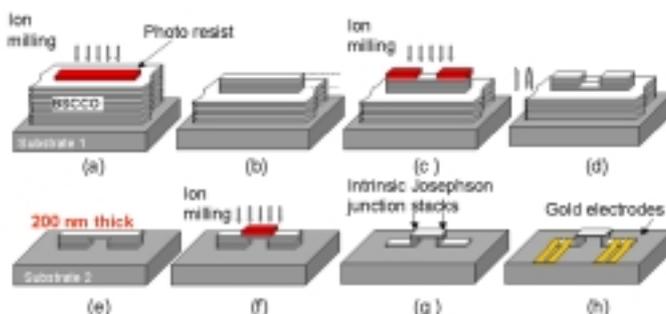


図2 新しい作製プロセス

(2) 超伝導アンテナや他の超伝導外部回路を接合スタックと共に集積することがすべて同一の超伝導体で作製できるようになった（図3）。

スタックを1つだけではなくアレー化させることで、100,000以上もの接合を直列に結合させることが可能になり、更にそれらを1つのチップ上に作製することもできる。図4に、MgO基板上に作製したアレーを示す。これには約11,000（45接合×256スタック）もの接合が含まれている。

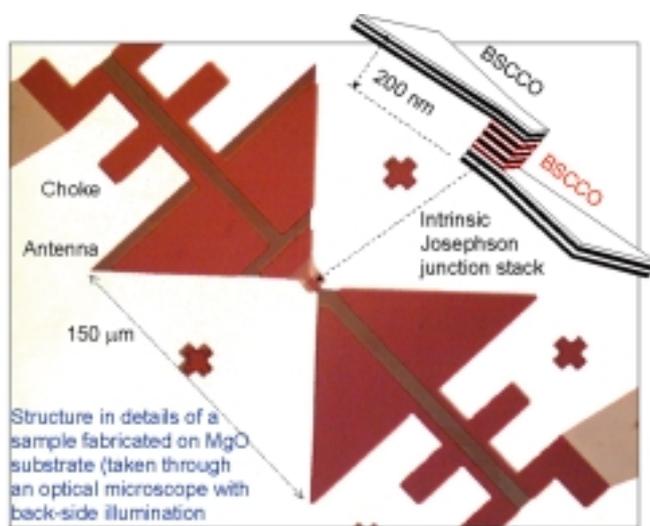


図3 チョークフィルタ、ポータイアンテナと共に集積化された単一 IJJスタック

(3) 我々は固有ジョセフソン接合のテラヘルツ電磁波応答を観測し、2.5THzまで明瞭なシャピロステップ²を観測した。この結果は、IJJがテラヘルツ帯で効果的に機能することを明確に示すものである。図5はこのときの256スタックの典型的なI-V特性である。0.76THzにおいて量子化された零交差ステップが2.5Vまで観測された。これらのステップは、50Kまで観測された。

このように、IJJの新たな作製プロセスを開発し、テラヘルツ応答を直接観測することにより、筆者は、冒頭に述べた問いに対する答えを得た。さらに、これらは、単結晶から高温超伝導回路を作るといった全く新しい発想が取り入れられていることから、今後、多くの科学技術分野で応用が期待される。

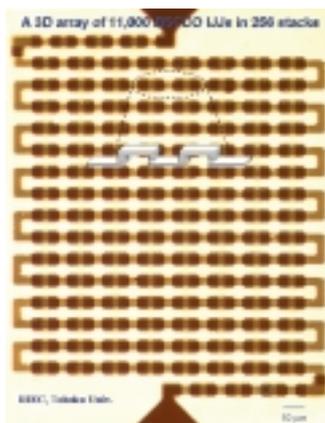


図4 直列に超伝導接続された
256 IJJスタック (11,000接合を含む)

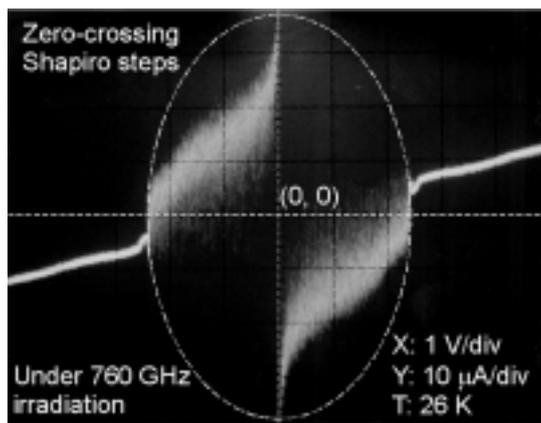


図5 11,000接合のテラヘルツ応答
2.5Vまで量子化零交差ステップが観測された

3. 今後の展開

今後、様々な分野でIJJを利用した多くの応用が可能となるであろう。その中のいくつかの例を以下に示す。

量子化電圧標準

筆者らの実験で観測された零交差シャピロステップは、高温動作 (50K以上、商用の冷凍機で冷却可能な温度) の量子電圧標準の構築を可能にした。これらは、従来の低温動作 (4.2K) の電圧標準に取って代わるものと考えられる。

テラヘルツ電磁波発振器

近年、Tachikiらは、高温超伝導体内部でテラヘルツ帯の強いプラズマ振動が起こることを理論的に予測した。これを受けて、テラヘルツ発振超伝導素子に関する大規模シミュレーション研究会が発足された。設計の最適化と信頼性の高い作製プロセスにより、テラヘルツ発振器の実現が期待される。一方、Barbaraらは、Nb系ジョセフソン接合アレーで数百ギガヘルツのレーザー発振が起こることを報告した。放射パワーは N^2 (Nは接合数) に比例する。筆者らの技術では同一チップ上に100,000以上の接合を作製できるため、期待される発振出力は、彼らのデバイスに比べ、100,000高く、つまりテラヘルツ帯で1~100mWにも及ぶ。

最近、ヨーロッパやアジア圏 (主として日本) の研究機関で、筆者らが開発したプロセスが盛んに利用されている。これらの努力により、IJJがナノサイズにスケールダウンされ、集積化されれば、テラヘルツ帯の発振器と受信器、量子コンピュータ等の開発で多くの成果が生まれ、その結果、情報技術産業の発展に寄与するに違いない。

補足説明

1 ジョセフソン接合

二つの超伝導体が薄い絶縁膜で隔てられた構造をもつ接合。絶縁膜を電子対がトンネル効果で通過することにより、量子効果が巨視的スケールで現れる。

2 シャピロステップ、零交差ステップ、電圧標準

ジョセフソン接合に電磁波を照射すると、電流 - 電圧特性上で f をその周波数として $V = nhf / 2e$ (n は整数、 h はプランク定数、 e は素電荷) のところで定電圧ステップ (シャピロステップ) が現れる。ある条件下でシャピロステップは、電流バイアスしなくても現れ、電圧軸を跨ぐように零交差ステップとなる。一方、周波数は最も正確に測られる物理量の一つであるが、零交差ステップの示す電圧を先の周波数と電圧の関係式より、精密に決定することができる。現在、この原理に基づく電圧標準 (器) が国際標準となっている。

参考文献

1. H. B. Wang, P. H. Wu, and T. Yamashita, " Terahertz responses of intrinsic Josephson junctions in high T_c superconductors", Phys. Rev. Lett. 87, p.107002, 2001.
2. H. B. Wang, P. H. Wu, and T. Yamashita, " Stacks of intrinsic Josephson junctions singled out from inside $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ single crystals", Appl. Phys. Lett. 78, p.4010, 2001.
3. H. B. Wang, et al., "Zero-crossing Shapiro steps in stack arrays of BSCCO intrinsic Josephson junctions and their possible application to quantum voltage standards", Appl. Phys. Lett., 80, p.1604, 2002.