

高温超伝導体における固有ジョセフソン接合

京都大学 大学院工学研究科 掛谷一弘

1. はじめに

層状の結晶構造を持つ高温超伝導体において、超伝導秩序パラメータの振幅は CuO_2 層で大きく、電荷を供給するブロック層で小さい。この結晶構造に由来する秩序パラメータの変調はジョセフソン接合の直列接続と本質的に同じであり、固有ジョセフソン接合と呼ばれる。異方性の高いビスマス系超伝導体では、秩序パラメータ振幅の変調は極めて強く、弱く結合したジョセフソン接合列として記述される。このとき、固有ジョセフソン接合はダンピングの極めて小さい理想的なトンネル特性を示す。

本稿では、固有ジョセフソン接合におけるトンネル特性を用いた最近の 2 つの研究成果について紹介する。ひとつは、一組の CuO_2 層間のトンネル特性を利用して CuO_2 層における準粒子スペクトルを測定する固有トンネル分光である[1]。もう一つは、固有ジョセフソン接合における振動を同期させて外部にテラヘルツ領域の電磁波を共振させることである[2]。

2. 固有トンネル分光

超伝導電子対を励起して相互作用を持った電子に分裂させたものを(ボゴリューボフ)準粒子と呼ぶ。準粒子は超伝導電子対形成に関して重要な情報を備えている。絶縁層を介して結合した超伝導体間の電流電圧特性から超伝導ギャップを与える準粒子状態密度が得られることをはじめに示したのは、Giaever であり、Josephson, Esaki とともに 1973 年のノーベル物理学賞を受賞した。従来超伝導体の準粒子状態密度は主にトンネル分光によって調べられた。

固有ジョセフソン接合においては、ブロック層がバリアの役割を果たし、電圧状態において準粒子トンネルによる電流が得られるため、電流電圧特性から CuO_2 層における準粒子状態密度を調べることができる。高温超伝導体では 90 年代以降、走査型トンネル顕微鏡や角度分解光電子分光によって実空間や波数空間で分解しうる準粒子スペクトルが得られており、華々しい成果が報告されているが、固有トンネル分光は超伝導ギャッ

プと最大ジョセフソン電流が同時にわかる唯一と言ってよい手法である。

超伝導ギャップ Δ と最大ジョセフソン電流密度 J_c の関係は Ambegaokar と Baratoff によって、

$$J_c^{AB} \approx \pi \Delta / 2eR_N S \quad (1)$$

と説明されている。固有トンネル分光では Δ, J_c と通常状態の抵抗(準粒子抵抗) R_N を独立に測定できるので、既知の接合面積 S を用いて高温超伝導体固有ジョセフソン接合で式(1)が成り立つかチェックできる。我々は、これらの物理量が正確に測定できるように、さまざまな工夫を凝らして測定を行っている。 R_N は超伝導が完全に壊れた状態での抵抗なので、電流電圧特性において超伝導ギャップを十分に超えた高電流部から見積もる必要がある。ここでは発熱を抑制するために、幅 $1 \mu\text{s}$ 以下のパルス電圧の印加を繰り返し、電流電圧特性を得ている。さらに、素子のほうにも自己発熱を最小化し、散逸させる仕組みを作り、超伝導ギャップを超える部分で電流電圧特性は原点を通る直線に漸近していく。一方、通常の測定の場合は発熱による Δ と R_N の温度変化により、漸近線は原点から大きく外れる。

さまざまなドーピング量の Bi2212 と PbBi2212 について、トンネル分光の測定を行って得られた J_c^{AB} と電流電圧特性の超伝導(ゼロ抵抗)ブランチの J_c を比較したものが図 1 である。まず、双方の物質において $J_c/J_c^{AB} \ll 1$ となっており、アンダードープに行くほど、抑制が強くなる。また、二

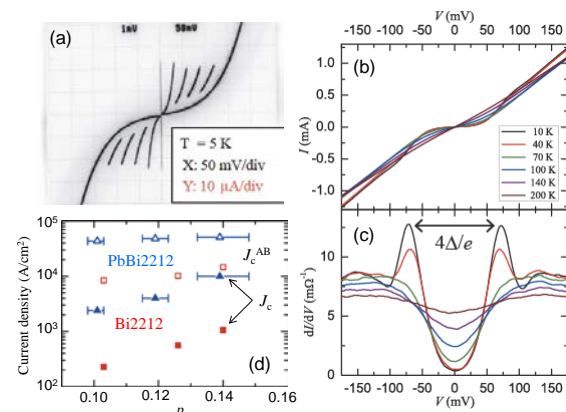


図 1 : (a)固有ジョセフソン接合における電流電圧特性. (b,c)パルスバイアス法による電流電圧特性および微分コンダクタンス. (d)ドーピング依存性の Pb 置換による比較

つの物質を比較した場合、抑制の割合はBi2212が強く、Pb置換により式(1)に近づいていく。

アンダードープBi2212において、角度分解光電子分光などにより波数空間の (π, π) 方向にフェルミ面の断片(フェルミアーク)が存在することが報告されている。数値計算をおこなうと、フェルミアークを $(0, \pi)$ 方向に延ばしていったとき、 J_c は式(1)に近づく結果が得られる。したがって、Bi2212ではドーピングの増加によってフェルミアークが $(0, \pi)$ 方向に延びていることが考察され、Pb置換によりフェルミアークはさらに延びていると解釈される。

3. 高温超伝導 THz 素子

交流ジョセフソン振動を接合外に取り出して発振器にするという発想は古くからあり、様々な方法が試みられてきた。工学的に有用な強度を得るために、多数のジョセフソン接合を同期させることが本質的に不可欠である。その点で、固有ジョセフソン接合積層系は極めて有利な立場にあり、当初より精力的な研究がなされてきた。ジョセフソン振動の素励起としての描像はジョセフソンプラズマであり、Bi2212では長波長の極限において概ね100 GHzに位置している。したがって、積層する接合において同期したジョセフソンプラズマを励起させれば、テラヘルツ領域の電磁波を発振させることができ、波数を制御することにより発振周波数を制御できる。

10年余りに渡る様々な試行錯誤の末、筑波大学在籍当時の筆者を含む研究グループによって

固有ジョセフソン接合から外部へのサブTHz領域のマイクロワット級の電磁波の発振が確認された。その後の研究により、発振が観測されるとき、素子構造のサイズから得られる空洞共振条件と交流ジョセフソン効果が一致していることが分かった。しかしながら、その逆は必ずしも成り立たず、発振特性の制御という技術的な観点に不満を残していた。

電磁波の発振が観測されている条件ではメサ構造素子の自己発熱は極めて大きく、前節のトンネル分光測定とは異なり温度分布も極めて不均一となっていることが推測される。我々はメサ構造上の電極が熱浴になることに注目して、電極の厚さを変えた同サイズのメサ構造素子からの発振の有無について測定を行った。電極が薄いほど自己発熱を熱浴に逃がす効果が減少し、温度分布は不均一になることが予想される。不均一な温度分布がジョセフソンプラズマ振動の同期を助長する場合は、電極厚さの薄いメサが発振を示すはずである。

実験結果は、同じ結晶上に作成したメサでも電極が薄い場合は発振が検出され、厚い場合は発振が検出されない、ということであった。図2には電極の厚さが100 nmのメサ構造素子における電流電圧特性と検出強度が示されているが、同一の結晶上に作成した電極厚さ400 nmの素子からは発振を検出することができなかった。銅酸化物超伝導体は同じ物質でも元素比が若干異なると超伝導特性が大きく異なることがあるが、同一結晶であれば、その心配は無いものとして考えることができる。つまり、発振の有無を分けるのは電極の厚さだけであることを示したことになる。

謝辞

本稿の成果は、鈴木実名誉教授および集積機能工学講座の構成員との共同研究による。心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] H. Kambara *et al.*, Phys. Rev. B, **87** 214521 (2013) および引用文献
- [2] I. Kakeya *et al.*, Appl. Phys. Lett., **100** 242603 (2012) および引用文献

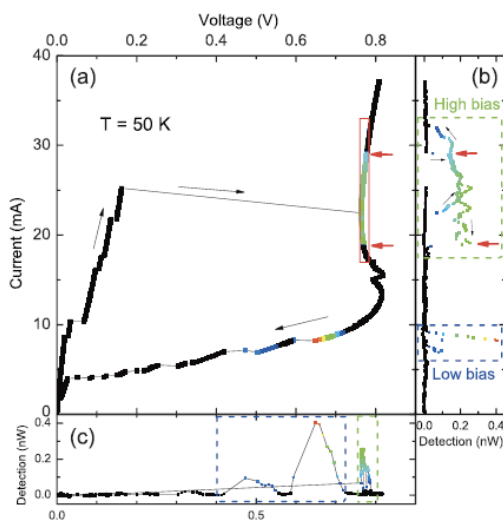


図2：固有ジョセフソン THz 光源の電流電圧特性(a)と発振強度(b,c)の関係