

集積機能工学講座

<http://sk.kuee.kyoto-u.ac.jp>

「偏光解析による高温超伝導テラヘルツ光源の同期発振現象の解明」

電波と光の中間の周波数に位置するテラヘルツ (THz) 領域はこれまでに 1 mW を超える実用的な強度を持つ固体光源が得られていませんでした。マイクロ波領域のようにキャリアのダイナミクスを利用しようとしても半導体の移動度の上限から周波数が制約され、LED のように量子効果を利用する場合にもそのエネルギーは 10 ケルビン以下の温度に相当するので、極低温が必要となるからです。超伝導体のトンネル接合であるジョセフソン接合では、交流ジョセフソン効果により直流電圧を交流電流に変換することが可能であるだけでなく、超伝導ギャップにより集団励起状態が保護されるので、散逸の少ないコヒーレントな電磁波が励起されることが期待されてきました。2007 年に高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ (Bi2212) から結晶外への THz 波放射が初めて観測された後の研究により、単色でありながら 0.3 から 11 THz という広い可変周波数範囲、最大 0.6 mW という高い放射効率という際立った特性が現在までに報告されています。これは、Bi2212 単結晶表面に形成されたメサ構造に含まれる 1000 程度の「固有」ジョセフソン接合が同期して振動する結果と考えられています。高い放射強度を目指して試みられているのが、複数メサ構造素子の同期発振です。同一の超伝導体上に形成した複数のメサ構造素子を並列または直列に接続して直流電圧を印加することで、それぞれのメサ構造素子で励起される巨視的なジョセフソンプラズマ振動が同期した結果、素子数の 2 乗に比例して強度が増加し、放射強度 0.6mW を達成したと報告されています。しかしながら、同期発振をもたらす素子間の結合の微視的な機構はほとんど理解されておらず、高強度発振器を設計することは極めて困難であった。そこで私たちは、放射されるテラヘルツ波の偏光観測から素子に励起されたジョセフソンプラズマ振動の状態を推定し、素子を結合する超伝導単結晶基板を介した結合メカニズムを解明する手法を提案した。

図のように、単結晶基板上に形成した2つのメサ構造素子から放射されるテラヘルツ波の強度、周波数、そして偏光を単独動作と並列接続同時動作の場合で観測しました。偏光観測により、電磁波の位相が推定できるので、発振状態をベクトル表現することが可能になります。その結果、同時動作の発振状態が2つの素子の単独動作を基底とする線形結合で記述できることを示しました。この成果は、パラメータを変えた測定を進めていくことにより、2つのメサ構造に励起されたジョセフソンプラズマ振動の相互作用行列を推定することを可能にし、高強度放射素子設計の道筋をつけただけでなく、テラヘルツ量子通信デバイスの可能性も提案しています。本研究成果は[京都大学ホームページ 2020年5月15日付「最新の研究成果」](#)で公開されています。

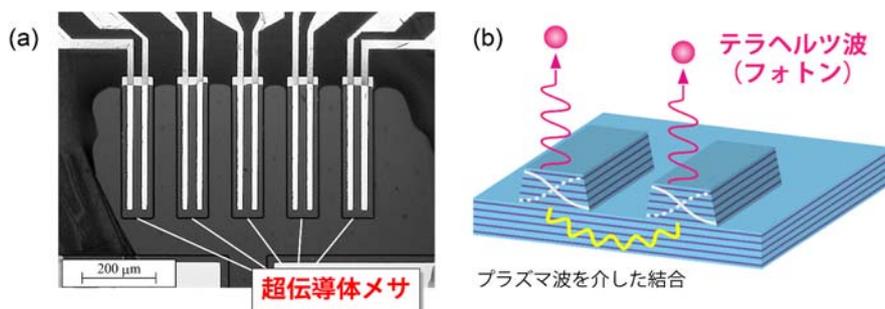


図: (a) 超伝導体メサ(台地)を5つ並べたアレイ構造の顕微鏡写真。上下に伸びた電極からメサに電流を注入するとテラヘルツ波が発生する。(b) 同期する超伝導体メサの概念図。隣り合うメサが超伝導体プラズマ波を介して結合し、高強度なテラヘルツ波(フォトン)が発生する。