

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易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、極低温が必要であるからです。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) からの結晶外への THz 波放射が初めて観測されました。THz 発振のメカニズムは、交流ジョセフソン効果により励起された電磁波が Bi2212 単結晶からなる空洞共振器の共振条件に一致した時、積層するジョセフソン接合で同期した振動が起こると考えられています。これまでの研究で、周波数範囲 0.3-1.6 THz、最大出力 0.6 mW の単色電磁波の放射が報告されています。高温超伝導 THz 光源は超伝導体に電流を注入して有限電圧で動作させるため、ジュール発熱を原因とする温度上昇が超伝導状態を破壊して、光源の出力が低下してしまうという問題が指摘されていました。

私たちは、電流を注入する条件による温度分布と発振強度を精密に比較するために、100 K 以下の極低温環境でも素子表面の微細な温度分布を観測できるイメージング装置を構築しました。これは、蛍光強度が強い温度依存性を示す Eu-TFC ポリマーと呼ばれる希土類元素を含む物質を素子表面に薄く塗布して、蛍光の空間分布を観察する実験手法です。素子は 2 つの電極を有しており、ひとつの電極から電流を注入する非一様 (non-uniform) 条件とふたつの電極から同じ電流量を注入する一様 (uniform) 条件における温度分布と発振強度を比較できるようになっています。図に示すように、電流値が 20 mA 前後の発振領域では、素子表面の温度は一様条件の方が明らかに高く、 T_c を超えている部分の面積は広がっています。一方、図(b)のように、発振強度は非一様条件と比較して 20 %程度弱くなっていることがわかりました。また、図(c)に示すように、電流値が 5 mA 程度の発振領域において温度分布、発振強度共に有意な差は見られませんでした。この結果は、数値シミュレーションでも再現され、素子表面における過剰な温度上昇が発振強度を抑制することを明らかにしました。このことは、高温超伝導 THz 光源を効率的に冷却することが発振強度を向上させると言うことを意味しており、高出力 THz 光源の実現に繋がると考えられます。

Physical Review Applied 誌で公表された本成果は、2014 年 10 月 22 日付けで京大ホームページにおいて紹介され、翌日付日刊工業新聞などに掲載されました。

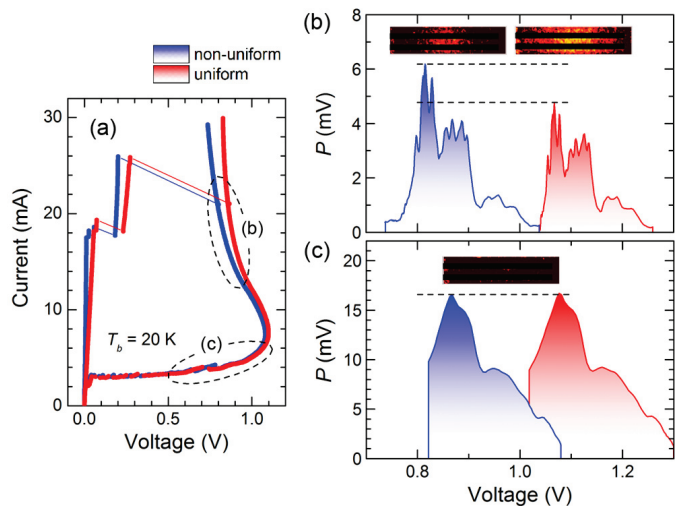


図:(a) 素子の電流電圧特性。破線で囲んだ領域で発振が起きる。青(非一様)と赤(一様)の違いは、素子に由来しない。(b) 高バイアス領域での発振強度と温度分布の比較。温度上昇がより顕著である一様条件での発振強度が低い。(c) 低バイアス領域での比較。両者に差は見られない。