

## 高温超伝導体単結晶を用いた連続テラヘルツ波発振器の開発

Development of high temperature superconducting terahertz emitters

—高温超伝導体の社会実装に向け—

数理物質系 物質工学域 柏木隆成

電波と光波の中間の周波数帯域に位置する波長 0.1~1 mm 程度のテラヘルツ(THz)波は、次世代の電波技術への応用の観点から注目されている。例えば、非破壊検査・分析技術、セキュリティ、大容量通信技術、電波天文などの基礎科学、ガンなどの医療診断と幅広い応用が期待されている[1,2]。このような THz 波応用を推進する上で、小型・安価・簡便な THz 帯の発振器及び検出器の開発は必要不可欠である。近年、THz 量子カスケードレーザーや共鳴トンネルダイオードなどの半導体デバイスによる THz 帯の小型発振器が精力的に開発されている[3,4]。そのため、これまで THz ギャップとして知られてきた小型で高出力の発振器が不足していた状況が、徐々に改善されつつある。

我々は、高温超伝導体  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi2212)単結晶を用いた THz 波発振器(Bi2212-THz 波発振器)により、上記ギャップの打破を目指して研究を進めている[5]。この Bi2212 単結晶は、銅酸化物高温超伝導体の 1 つであり、超伝導転移温度は、液体窒素(77 K)より高温の約 90 K である。またこの材料は、発見から 30 年近く経つ現在も、超伝導発現機構解明の観点から、精力的に研究されている物質でもある。

Bi2212 単結晶は、結晶  $c$  軸方向に、超伝導を示す  $\text{CuO}_2$  層と絶縁体の  $\text{Bi}_2\text{O}_2$  層が交互に積層した特徴的な構造をもつ層状物質である。そして絶縁体を超伝導体でサンドイッチしたジョセフソン接合を結晶内部に自然に形成することから、固有ジョセフソン接合と呼ばれる[6]。厚さ 1  $\mu\text{m}$  の Bi2212 単結晶には、原子レベルで均一なジョセフソン接合が約 670 枚含まれる。2007 年には、Bi2212 単結晶の表面に $\sim 80 \times 400 \times 1 \mu\text{m}^3$  程度のメサ構造を作製し、このメサ構造内の固有ジョセフソン接合に電圧を印加することで生じる交流ジョセフソン効果[7]を利用して、結晶の外部に THz 波が放出可能であることが示された[8]。

この 2007 年の発見以降、国内外の幾つかの研究グループを中心に Bi2212-THz 波発振器の研究が継続的に行われている。現在までの代表的な発振特性としては、発振周波数にして 0.3~11 THz 程度、発振出力では 0.6 ミリワット程度(アレイ構造)、発振線幅は数十~数百 MHz 程度、偏波面の制御、外部共振器を利用した発振などがある。また、この発振器を利用した非破壊イメージングや分光測定の新技術も開発されている[9]。

現在、我々は、この Bi2212-THz 波発振器の社会実装に向け、発振出力を向上させることを目標に研究を行っている。そのために具体的には、素子材料の最適化、素子製作技術及び素子構造の改良などを中心に研究を進めている。さらに、小型冷凍機を用いた発振システムの開発なども国内企業との共同研究を通じて行っている。本発表では、Bi2212-THz 波発振器に関する国内外の他研究機関の成果の状況を述べるとともに、我々のグループでこれまで行ってきた発振器開発とその現状について紹介する。

- 1) B. Ferguson and X.C.Zhang, *Nat.Mater.* **1**, 26 (2002).
- 2) M. Tonouchi, *Nat. Photonics* **1**,97 (2007)., S.S. Dhillon *et al.*, *J. Phys. D Appl. Phys.* **50**, 043001 (2017).
- 3) M. Asada and S. Suzuki, *J. Infrared Milli. Terahertz Waves* **37**, 1185 (2016).
- 4) B. S. Williams, *Nat. Photonics* **1**, 517 (2007)., K. Fujita *et al.*, *Nanophotonics* **8**, 2235 (2019).
- 5) 例えば, T. Kashiwagi *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **30** 074008 (2017).
- 6) R. Kleiner *et al.*, *PRL.* **68**, 2394 (1992).
- 7) B.D. Josephson, *Phys. Lett.* **1**, 251 (1962).
- 8) L. Ozyuzer *et al.*, *Science* **318**, 1291 (2007).
- 9) R. Kleiner and H. Wang, *J. Appl. Phys.* **126**, 171101 (2019). などのレビュー論文をご参照下さい。