



第71回 応用物理学会春季学術講演会 注目講演プレスリリース

2024年 3月 18日

Bi2212ジョセフソンプラズマエミッタの同期現象の時間発展解析
Temporal evolution analysis of the synchronization phenomenon
of the Josephson plasma emitter of Bi2212

ジョセフソンプラズマ光源がテラヘルツ通信を「FM」にする 次世代通信技術・6G通信システムの要素技術として期待

京大院工¹, 産総研²

○(M1)宮本 将志¹, 小林 亮太¹, 柳生 望光¹, 桑野 玄気², 辻本 学², 掛谷 一弘¹

E-mail: miyamoto.masashi.24a@st.kyoto-u.ac.jp

【発表概要】

- ・ ナノ秒スケールによる高速電圧変調によって、これまで未知だった多数ジョセフソン接合の同期現象の時間発展を明らかにした。
- ・ Bi2212ジョセフソンプラズマ放射源が、原理的には非常に広い範囲(>数100GHz)でテラヘルツ波を放射できる可能性を示した。
- ・ 超広帯域を用いたテラヘルツ通信 (835GHz) の新方式および、単一素子の簡易的なテラヘルツ物性検査への応用を提案

京都大学大学院工学研究科の掛谷一弘准教授、宮本将志氏（大学院修士課程）、および産業技術総合研究所量子・AI融合技術ビジネス開発グローバル研究センターによる研究グループは、高温超伝導体材料（Bi2212）を用いた小型で安定した発振を実現できる超伝導テラヘルツ（THz）光源「ジョセフソンプラズマ放射源（JPE）」を開発するとともに、高速周波数変調技術（FM技術）を実証した。この技術により、発振周波数領域が拡大できることを示した。同技術は130Gbpsという、1時間の4K動画（61ギガバイト）を3.8秒で転送できるデータ転送速度を達成し、テラヘルツ領域を利用した次世代通信技術であるBeyond 5G/6G通信システムに不可欠な要素技術となることが期待される。応用物理学会の注目講演では、JPEを用いたテラヘルツ放射のナノ秒スケールの時間発展について報告する。また、関連講演に「ジョセフソンプラズマエミッタのテラヘルツ周波数変調放射における非線形光学現象[25a-12N-5]」がある。

【詳細】

単一素子でテラヘルツ波を放射可能なジョセフソンプラズマ放射源

テラヘルツ周波数領域は光と電波の間にあり（0.1 THz～10 THz）、非常に広大な帯域幅を持ち、高速なデータ通信が可能であるため、次世代の無線通信技術において重要な役割を果たすことが期待されている。特に、5Gの後継として注目される6Gの通信では、テラヘルツ周波数領域の利用がさらなる高速データレート、低遅延、高信頼性、および大量のデバイス接続性の実現に向けた鍵となると考えられている。

しかし、現状ではそうした次世代の無線通信を実現するための実用的なテラヘルツ光源や検出器の研究開発が遅れている（テラヘルツギャップ）ことが課題だという。「たとえば半導体を用いた『量子カスケードレーザー（※1）』や『共鳴トンネルダイオード（※2）』などがありますが、デバイスの微細加工が必要です。さらに半導体では原理的にすべてのテラヘルツ帯をカバーする光源の実現は難しいとされています。そこで私たちは、超伝導を光源に用いることを試みてきました」と京都大学大学院工学研究科の宮本将志氏は話す。

宮本氏らが提案するジョセフソンプラズマ放射源（JPE）は銅酸化物高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ （Bi2212）の単結晶基板の上に、特定の領域を隆起させた形状「メサ構造」を形成した素子（図1）だ。この素子は、単結晶内に超伝導層が絶縁性を持つ層にサンドイッチ状に積層された構造「ジョセフソン接合」を持つ。ジョセフソン接合を有する構造体に電圧を加えると、「トンネル効果（※3）」によって、加えた電圧に比例する超伝導電流が発生する「ジョセフソン効果」を生じることが知られている。さらに高温超伝導体材料の単結晶にはジョセフソン接合が高密度に、かつ均一に存在していることが知られており（多数ジョセフソン接合）、電圧を加えることによって、それぞれの接合における「交流振動（※4）」が同期することでテラヘルツ波が放射される。

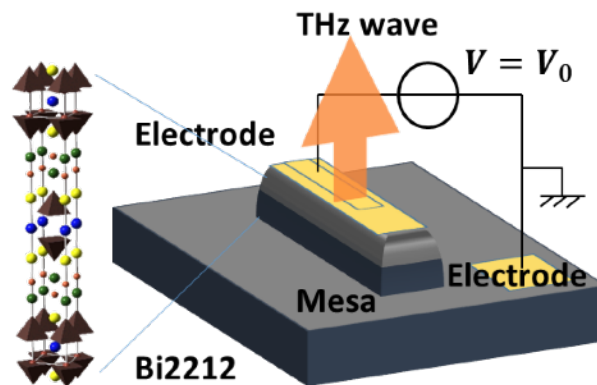


図1: JPEの概略図

- ※1 量子カスケードレーザー (Quantum Cascade Laser, QCL) 半導体レーザーの一種。量子井戸と呼ばれるナノスケールの構造を持つ半導体層を積層して構成される。
- ※2 共鳴トンネルダイオード (Resonant Tunneling Diode, RTD) 量子力学における「トンネル効果」を利用した特殊な半導体デバイス。
- ※3 トンネル効果 量子力学において電子などの微小な粒子が、古典的な物理学の観点からは乗り越えることが不可能とされるエネルギー障壁を、ある確率で突き抜ける現象。
- ※4 単一の接合に電圧Vを加えると、周波数 $f=V/\Phi_0$ となる交流振動が生じる。

テラヘルツ通信にFMの可能性を見出す

研究グループは、この高温超伝導体材料 (Bi2212) の多数ジョセフソン接合を発振原理に用いることで、テラヘルツ帯の電磁波を放射する光源を実現するとともに、周波数変調 (FM) を実現した。「私たちはJPEの特徴である、加える電圧を変えるだけで周波数をチューニングできるということ、広帯域の発振範囲 (1~11Thz) を持つことに着目しました」と宮本氏は話す。テラヘルツ波がFMとして利用できることがもたらす利点は、主に通信システムに応用する際の「信号対雑音比 (SN比)」の向上が挙げられるだろう。ラジオでおなじみのFMは「振幅変調 (AM)」と比較し、高いSN比を実現できるため、より信頼性の高いデータ伝送が可能になる。また、FMを用いることで周波数領域を広げることにもできる。これにより、超広帯域のFMテラヘルツ通信を実現することが可能になる。

研究グループは加える電圧に、3GHzと10kHzの変調を加えながら、その発振領域を観測し、比較する実験を行った (図2)。「実験の結果、最大バンド幅40GHzを実現し、通信として用いると100Gbpsを超える無線通信性能 (130Gbps) を示唆する結果を得ることができました」と宮本氏は話す。次に、3GHz程度的高速で電圧を変化させると、ジョセフソン接合の同期が保たれる (同期現象の緩和) ことが明らかになった。さらにJPEのテラヘルツ発振領域は835GHzに限られていたが、3GHz程度的高速で電圧を変化させると、発振領域外でもスペクトルが観察されたのである。「この結果は、高速で電圧を変調すると、テラヘルツ波の発振領域を広げることができることを示唆しています」と宮本は振り返る。

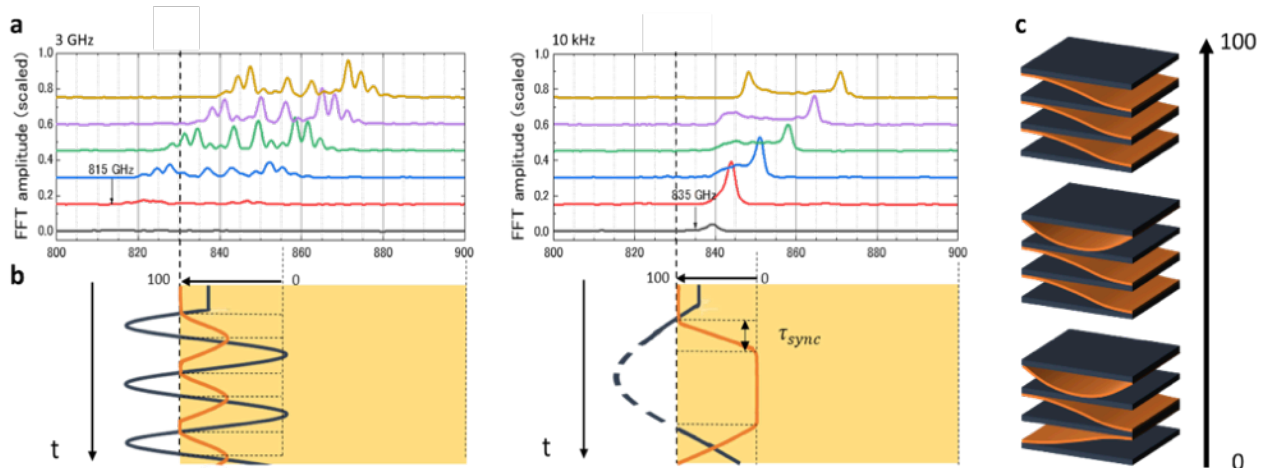


図2: a: 3 GHz (左) と10 kHz (右) の電圧変調下におけるスペクトルの直流電圧の変化の比較。b: ジョセフソン接合の同期現象の緩和時間を説明するモデル。黄色の領域は JPE が発振する電圧範囲、黒の曲線は瞬時バイアス電圧、オレンジの曲線はジョセフソン接合の同期の強さを表す。c: ジョセフソン接合の同期現象の模式図。

多数ジョセフソン接合のナノ秒スケールの時間発展を明らかに

研究グループはさらに踏み込み、高温超伝導体材料 (Bi2212) における多数ジョセフソン接合を、ナノ秒スケールの時間発展から明らかにした。つまり、周波数領域を広げるような発振が、どのような変調周波数で起きるかを、より詳細に定量化することを試みた。

研究グループが無変調時の発振範囲を測定したところ、835GHzから920GHzだった。そして変調周波数100MHzと1GHzの間に、スペクトルの違いが見られた。そこで変調周波数を100MHzから1GHzの間でさらに細かく分けて測定したところ、変調周波数が上昇するにつれて、次第に無変調時の発振範囲の下限 (835GHz) を越え、とくに700MHz以上で顕著に発振することが明らかになった (図3)。

実験の結果としては、JPE内の多数ジョセフソン接合の同期は数nsで消えること、さらに1GHz以上の高速で変調されたとき、JPEの発振範囲は数100GHz以上という、非常に広い範囲となる可能性があることを示した。この現象について、研究チームはシミュレーションを用いた解析を進めており、応用物理学会の注目講演にて発表される。

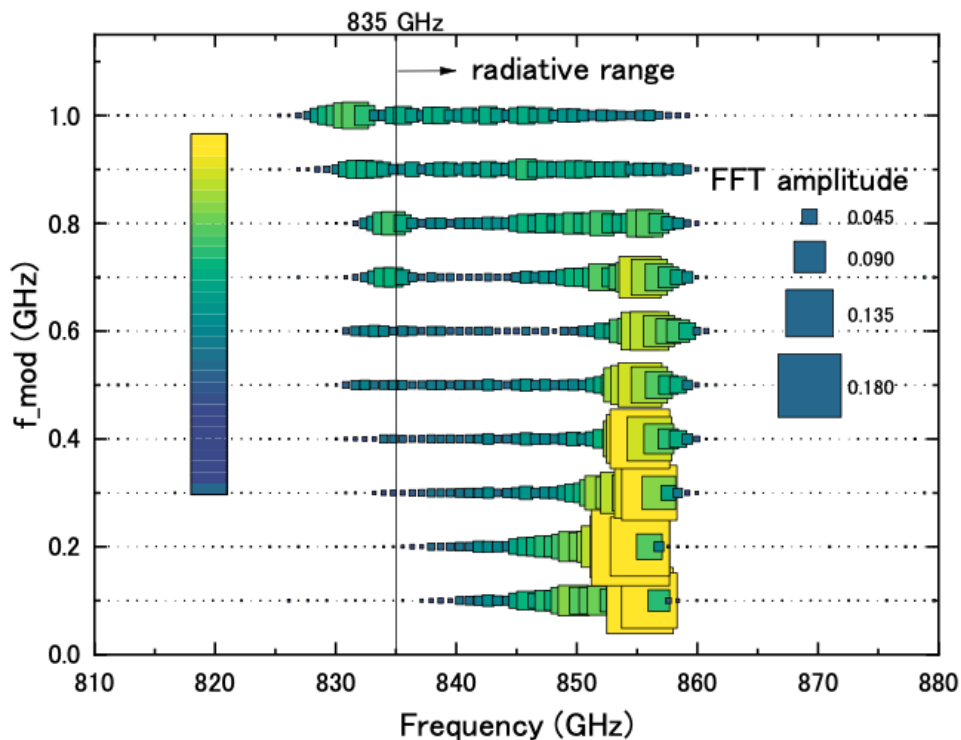


図3: 変調印加時の発振範囲のバブルプロット 縦軸に変調周波数、横軸に発振範囲を示す周波数をとる。

実用性が高いテラヘルツ帯の光源とものさしを手にした

「今回の研究は、単一の小さな素子でテラヘルツ波を放射できるJPEと、周波数のものさしである、いわば『テラヘルツ周波数コム（※5）』を同時に開発できたという点が新しいと感じます」と掛谷一弘准教授は振り返る。周波数コムは、未知の光源の周波数を決定するための、いわば周波数のものさしとなる光源のことだ。JPEは、とくに正確さが求められる通信に使われる光源の測定に有用だという。今後6G通信技術などにJPEはどのように応用されていくのか、掛谷准教授は、新しい分野を開拓していくことを示唆する。

「テラヘルツ波によって6G通信を実現しようとするアプローチには、すでいくつか有望なものがあります。たとえば2021年に、大阪大学とローム株式会社の研究グループは、300GHz帯のテラヘルツ波を用いて、非圧縮フル解像度8K映像の無線伝送に、世界で初めて成功しています。この成果は共鳴トンネルダイオードを用いた半導体デバイスによって実現され、8K映像の信号伝送には振幅変調（AM）をつかっています。共鳴トンネルダイオードは室温で動作するため、実装の簡便さには分がありますが、それに対して、JPEはFMという新たな可能性をテラヘルツ通信に与えるものと言えるでしょう。この特徴を活かし、テレビ局などで高速の無線通信が必要な場合に使うといった実装が想定できます」と掛谷一弘准教授は話す。

テラヘルツ波は物性検査にも応用できる。とくに、がん細胞と正常な細胞を区別するためのタンパク質の高次構造（※6）の決定などに使うことができる。現状のテラヘルツ分光が可能な光源は、複雑な光学系を用いてつくられているため簡便性が低いが、JPEは単一の小さな素子で、物性検査が実現できる。テラヘルツ波の社会応用に向けた、全く新しいアプローチが今生まれようとしているのだ。

※5 **周波数コム** 均等に間隔を置いた離散的な周波数成分から構成されるスペクトルを持つ光源のこと。このスペクトルは、櫛（comb）の歯のように見えることから「周波数コム」と呼ばれる。光学的な測定から通信など、多岐にわたる分野で用いられる。

※6 **高次構造** 高分子化合物の分子構造の概念を示す語。構成原子の相対位置を表す構造を総じて高次構造と呼ぶ。