

平成31年3月10日

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人 日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 平成29年度

受付番号 442

氏 名

辻本 学

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地（派遣先国名）用務地：デュページ郡アルゴンヌ（アメリカ合衆国）

2. 研究課題名（和文）※研究課題名は申請時のものと変わらないように記載すること。

高温超伝導体固有ジョセフソン接合を使ったテラヘルツ光源のアレイ化と超放射制御

3. 派遣期間：平成29年4月15日 ～ 平成31年2月12日

4. 受入機関名及び部局名

Argonne National Laboratory, Materials Science Division

5. 所期の目的の遂行状況及び成果

(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)

5-1. 研究目的

ビスマス系銅酸化物高温超伝導の単結晶メサアレイから位相同期したコヒーレントなテラヘルツ波が発生する物理メカニズムを解明し、テラヘルツ帯の技術的ギャップを埋める小型で簡便な連続光源を実装することが所期の研究目的である。簡便に利用できるテラヘルツ光源の実用化は、半導体素子を中心に発展してきたテラヘルツ技術に画期的な進歩をもたらすことが期待される。著者が本研究で対象とした高温超伝導体テラヘルツ光源の特徴である発振周波数の連続可変性を生かせば、特定の分子間相互作用やターゲット分子をピンポイントで抽出できるテラヘルツ分光が実現できる。また通信応用においては、単一発振器で広帯域をカバーできるというメリットがある。テラヘルツ技術の基盤となるこうした先端技術の基礎を開拓することが本研究の目的である。

今日、テラヘルツ波の応用技術が研究分野だけでなく産業分野でも注目されている。水素結合などの分子間相互作用の固有振動数がちょうど1テラヘルツ程度であることから、テラヘルツ分光では水やタンパク質などの構造解析や同定が簡単に行える。これは分析、薬学、医学への応用につながる。光子のエネルギーは小さく、生体材料など従来は取り扱いが難しかった試料の分析にも使える。レンズやミラーを使って自由に取り回せる性質は、セキュリティ利用、工業材料の検査、美術品の非破壊検査などのイメージング利用に適している。実際、パッシブ方式のテラヘルツボディスキャナーが空港でのセキュリティ利用に使われ始めた。通信分野では大容量データを超高速かつシームレスに送受信できるテラヘルツ無線の開発が進められており、映像中継の非圧縮伝送、災害復旧の暫定的ネットワークインフラなど社会的ニーズの高い技術へ適用できる。

テラヘルツ技術の発展を阻害する根本的な問題の一つに、高出力な連続テラヘルツ光源の不足が挙げられる(図1)。同型の半導体光源としては、量子カスケードレーザー(QCL)と共鳴トンネルダイオード発振器が近年盛んに研究されている。これらの半導体光源は開発の歴史も長いが、さまざまな問題のため実用化には至っていない。新しい連続テラヘルツ光源の候補として、著者は銅酸化物高温超伝導体に内在するナノ構造を使った超伝導テラヘルツ光源に注目した。高温超伝導体からのテラヘルツ波発生が派遣先の米国アルゴンヌ国立研究所Welp博士グループらによって実証されて以来、この現象に関する基礎研究が米国、日本、ドイツ、トルコ、ロシアをはじめ世界中で行われている。これまでの研究で明らかになったように、超伝導テラヘルツ光源はテラヘルツギャップを埋める可能性を有する光源と言っても過言ではない。なぜなら、この現象が超伝導の量子干渉効果(ジョセフソン効果)と呼ばれる、レーザー発振や高周波回路発振とはまったく異なる原理に基づいており、発振帯域や出力に原理的制約がないためである。

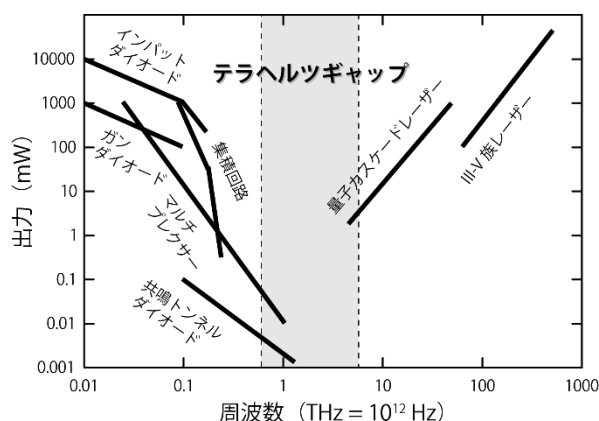


図1：代表的な小型テラヘルツ光源素子の一覧。1テラヘルツ近傍には光源素子が存在しないため、新しい光源素子の開発が各分野で進められている。出典はTonouchi Nat. Photon. (2007)。

5-2. 研究の遂行状況及び成果

本節では、研究の遂行状況と成果について3つの研究課題に区分して記述する。

研究課題1 小型パッケージ化されたテラヘルツ光源モジュールの開発

広範な学術分野と産業分野での利用を想定したテラヘルツ光源モジュールの実現を目指し、高温超伝導体光源、電極リード、コリメートレンズなどが一体化されたパッケージ部品の実装技術を確立し、素子の排熱構造を最適化したモジュール部品を開発した。図2にモジュール部品の概念図と製作した試作品の写真を示す。本課題では、レーザーリソグラフィ技法を応用した微細加工技術と数値シミュレーションによる発熱解析を組み合わせることで、モジュール構造の最適設計を行った。

従来の半導体テラヘルツレーザーでは自己発熱による出力低下の問題が指摘されており、サブテラヘルツ帯での連続発振は技術的に困難である一方、本技術はコヒーレントかつ連続波長可変なテラヘルツ波を超伝導現象の量子効果によって発生させることができる点で優位である。本研究の成果として、物理的及び化学的に安定で取り扱いやすいモジュール部品の実装を実現し、利用価値の高いコヒーレントな連続テラヘルツ波を簡単に発生できるようになった。想定される用途としては化学物質の同定及び精密分析、生体物質やセキュリティ用途の非破壊・非侵襲イメージング、高速無線通信用の発振器などである。研究成果は、英国 IOP 出版社の Supercond. Sci. Technol. 誌で原著論文として発表した。

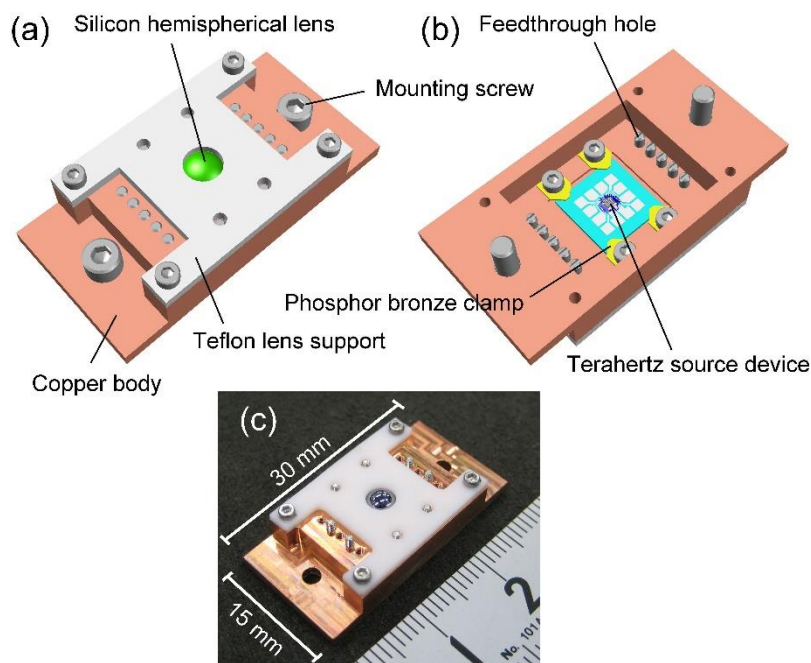


図2：開発した小型コヒーレントテラヘルツ光源モジュール。モジュールの概念図（(a)正面図及び(b)背面図）と(c)試作品の写真。

研究課題2 テラヘルツ帯ヘテロダイン検波による線幅測定とコヒーレンスの定量化

高温超伝導体テラヘルツ光源の基本原理として重要な固有ジョセフソン接合系の位相同期現象の物理メカニズム解明と、実用化を見据えた高出力化並びに周波数分解能向上を目指し、発振出力、発振周波数、スペクトル線幅を同時観測できる実験系を構築した(図3)。この実験系では液体ヘリウムを使用せずに試料を連続冷却できる Gifford-McMahon 式冷凍機クライオスタットを使用している。各種実験装置の設置、光学系の構築、測定プログラム開発、機械工作、電子工作、その他測定系の立ち上げから測定データ収集に至る一連の実験を行った。この実験系を用いた発振線幅測定の結果、固有ジョセフソン接合系の位相同期現象を示唆する実験結果が得られた。一連の成果について、2018年3月にロサンゼルスで開催された APS March Meeting 2018 で口頭発表を行った。

今後の課題として、開発したスプリットミラー型干渉計の周波数校正及び分解能向上、ワイヤーグリッド偏光子を使った偏波測定による空洞共振モードの同定、高バイアス域におけるコヒーレント発振の起源解明に向けた素子表面の温度分布計測などが挙げられる。電流電圧特性の内部ブランチ領域と発振線幅の相関を調べることで、ゼロ電圧状態と有限電圧状態が単結晶内部で混在した状態における発振現象が、コヒーレンスの観点からどのように記述されるかという点も興味を持たれる。外部電場及び磁場、機械的圧力効果も基礎研究のみならず応用研究の観点から重要である。

テラヘルツ波の偏波特性に関しては、京都大学掛谷グループとの共同研究によって素子の形状やバイアス条件を制御することで円偏波発生に成功した(共著論文が2017年に Applied Physical Letters 誌および Physical Review Applied 誌に掲載)。本研究で新たに提案した円偏波テラヘルツ波の発生技術は、移動型テラヘルツ無線通信における根幹技術として注目を集めている。

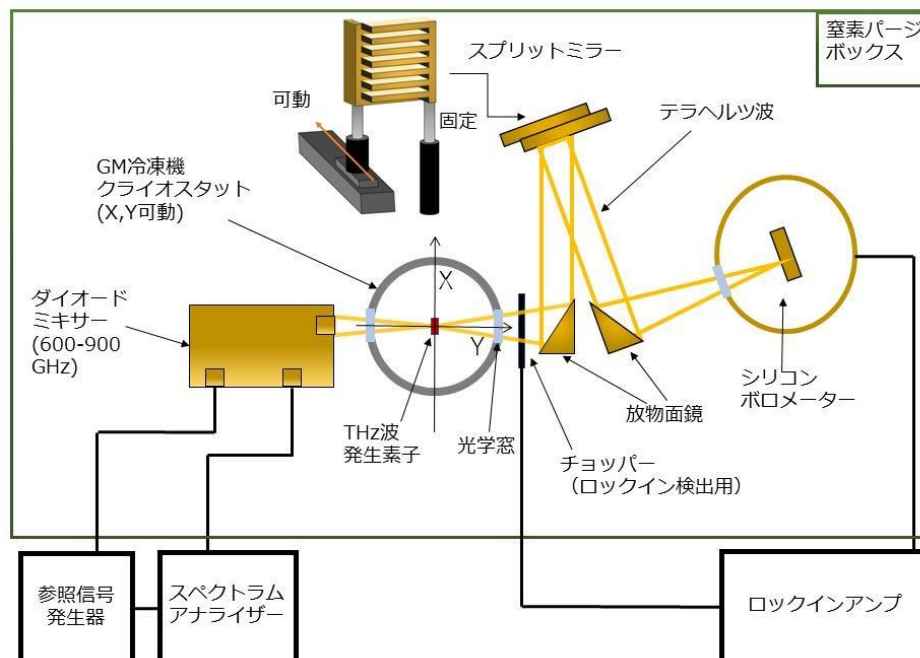


図3 : 構築した実験系の概略図。スプリットミラー型干渉計とテラヘルツ帯半導体ミキサーを用いることで出力、周波数、線幅を同時測定できる。

研究課題3 固有ジョセフソン接合列の特性分布と自発的同期機構の解明

高温超伝導体テラヘルツ光源の歩留まり改善は重要な課題である。著者は、テラヘルツ波の放射源である高温超伝導体メサ構造の側壁角が固有ジョセフソン接合列の特性分布幅に対応することに着目し、側壁角と放射特性の関係を明らかにすることで、安定で高効率な発振を実現する条件を明らかにした。これに際し、従来のレーザーリソグラフィ技法を改良して微細加工条件を最適化し、側壁角を精密制御できる手法を開発した(図4(a)及び図4(b))。素子特性を精密に評価した結果、接合特性が均一な素子では強いテラヘルツ波放射が生じることを示し、歩留まり改善に有用な知見を得ることができた。

本課題の実施にあたり、著者は派遣先の米国アルゴンヌ国立研究所の物質科学部局(Materials Science Division)で微細加工に関する技術を習得した。本研究の実施によって得られた研究成果は、2019年1月に米国オーランドのセントラルフロリダ大学で開催された 11th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and Plasma Oscillations in High-Tc Superconductors (Plasma 2019)の招待講演で発表した。また、原著論文は本年中にアメリカ物理学会の Physical Review Applied 誌にて発表予定である。

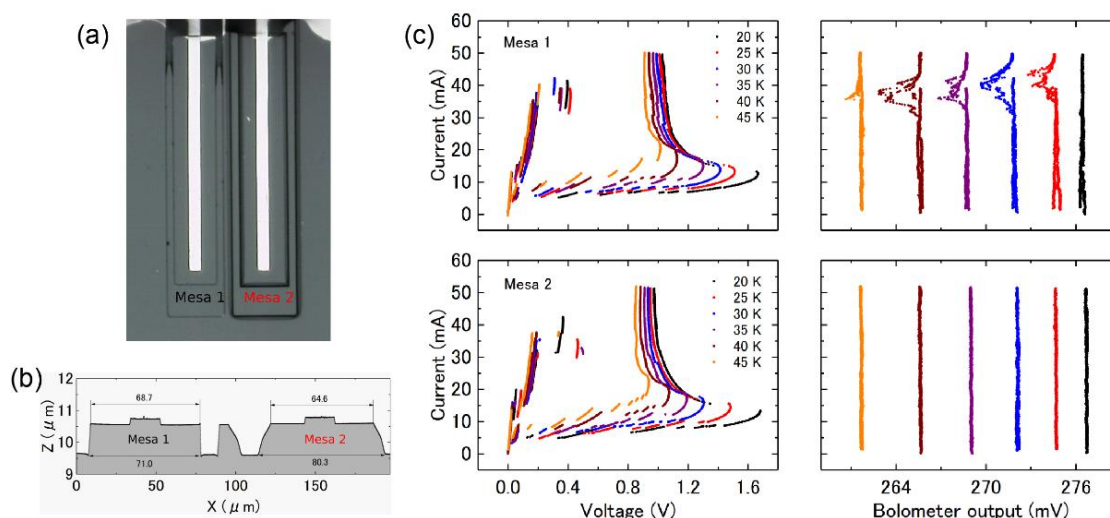


図4：異なる側壁角を持つ2つの高温超伝導体メサ構造の(a)光学顕微鏡写真、及び(b)原子間力顕微鏡で計測した断面プロファイル。(c)2つのメサの電流電圧特性(左上、右下)の熱浴温度依存性と、対応するボロメータ出力(右上、左上)。側壁が切り立ち、特性分布幅の小さいメサ(Mesa 1)からのみ、高強度なテラヘルツ波が放射されていることを示している。