

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名：超伝導による連続 THz 波の発振と応用

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点):

研究代表者

門脇和男(筑波大学大学院数理物質科学研究科 教授)

主たる共同研究者

立木 昌 (東京大学大学院新領域創成科学研究科 産学官連携研究員)(~平成20年3月)

古月 暁 (物質・材料研究機構計算科学センター グループリーダー)

3. 研究実施概要

高温超伝導体  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  は典型的な固有ジョセフソン接合系である。この系をメサ状に微細加工し、直流電流で駆動することで、THz 帯域の強い電磁波が連続的に発生する事を、2007 年、筑波大および、アルゴンヌ国立研究所のグループの共同研究によって発見した。本研究は、この現象の発見に基づいている。すなわち、この発振現象の物理的解明を行い、応用の可能性を追求する幅広い研究を実施することにある。具体的には、主に、(1)「THz 波の発振条件の確立」、(2)「広帯域 THz 領域の開拓と高出力化」、(3)「高強度発振素子によるイメージングへの応用」、の3点を中心として、実験と理論の両面から研究を行った。

まず、(1)の「THz 波の発振条件の確立」としては、様々なメサ形状を作成し、系統的に発振周波数や偏光特性を含む放射パターンとメサの形状の関係を調べた。その結果、発振周波数  $f$  は矩形メサの場合、メサの幅  $w$  に対してその逆数  $1/w$  に比例し、 $f=c_0/n\lambda=c/2nw$  の関係が成り立つことを明らかにした。ここで  $n$  は超伝導体の屈折率、 $\lambda$  は超伝導体内部での電磁波の波長、 $c_0$  は真空中での光速である。この発振条件は試料自身がその形状と大きさに適合した自己共振器(self-resonator)としての役目を果たすことを強く示唆している。事実、メサの形状と大きさによる空洞共振器(cavity resonator)としての役割は、その後、矩形メサのみで無く、正方形、円板、三角形(正三角形、2等辺三角形、直角三角形など)、五角形でも同様に成り立つことが分かった。

理論的には電磁波のメサ内部での固有モードを求めることと同等で有り、したがって、最も単純化したモデルでは誘電体を含む平行平板コンデンサーの共振条件を求める電磁波の解析に帰着する。ただし、現実には平行平板の中には超伝導電流(ジョセフソン電流)が流れていることを考慮し修正が必要である。現在では、この効果を取り入れ、FDTD(Finite-Difference Time-Domain)法によるシミュレーションを行うことで大変良く理解でき、現実にはメサの形状が分かれば電磁波の放射分布を含めて実測と定量的に一致する予測が可能となっている。

発振を規定している条件として、発振周波数  $f$  は常に  $f=(2e/h)(V/N)$  で表される交流ジョセフソン効果を満たす。ここで  $e$  は電子の素電荷、 $h$  はプランク定数、 $N$  はメサの厚さ方向の固有ジョセフソン接合数、 $V$  はメサに印加される電圧である。 $K_J=2e/h=483.597891(12)$  (GHz/mV)はジョセフソン定数である。これは高温超伝導体からの電磁波輻射の根幹をなすことが実験的に確認されている。個々の固有ジョセフソン接合がこの関係を満たし、量子力学的に同期することで強力な発振が起こることからこの現象をジョセフソンレーザーと呼んでいる。

(2)の「広帯域 THz 領域の開拓」のためには、メサにかかる電圧  $V$  を広範囲に変化させる必要がある。上記の2つの発振条件からこの電圧は  $V_{dc}=(c_0/2nw)(1/K_J)(2d/c)=48.2(d/w)$  (V)と表すことができる。ここで  $d$  はメサの厚さ、 $c$  は結晶の  $c$  軸長である。このことはメサの幅と厚さの比が分かれば発振に必要な電圧は予想することができることを意味する。この場合、周波数は固定されるように見えるが実際は空洞共振器の  $Q$  値がほぼ 10 程度(あるいはそれ以下)と大きくないため、発振許容範囲は  $f/Q$ ~数 100 GHz である。しかも、空洞共振の高次のモードが重なる場合、ほぼ連続的に高次のモードに移行して発振が可能である事が分かった。

「高強度化」に関しては、これまで発振条件を様々に変化し、最適条件を探す研究を行ってきた。広帯域化を犠牲にして空洞共振器の  $Q$  値を上げる方法が考えられるが、現状では具体的にまだ成功していない。また、他

の方法として、メサの下部にある大きな超伝導体結晶を除いた「単独メサ」を作成する方法がある。これによって強度がほぼ1桁改善することが分かっているので、これを起点に Fabry-Perot 型の共振器をメサに直接組み込むデバイスの設計を現在行っているところである。さらに、メサを並列に基板上に配置し、同期動作させることで強度を2乗倍することで、 $\sim \text{mW}$  クラスの発振に近い将来得られる事を期待している。

(3)の「イメージングへの応用」では、できるだけ高強度発振するメサを用い、透過型のイメージング装置を試作した。植物の葉や肉片、封筒内の硬貨、封筒内の剃刀の刃、フロッピーディスクなど様々なイメージを鮮明に得ることができた。また、石英板を楔形に配置し、THz 波の干渉を測定する事で直接周波数を測定するセルを開発した。このセルは中に液体を入れることで液体の吸収係数を精密に測定する事ができるという特徴を持っていて、現在、様々な液体やタンパク質などの吸収係数の測定を試みている。

最近、蛍光材を塗布し、メサの温度を直接測定する実験に成功した。高電流で発振させると、ジュール熱によりメサの温度が上昇し、熱浴から乖離する hot spot 現象が観測され、中心部では  $T_c$  以上 ( $\sim 130 \text{ K}$ ) にもなっている事が指摘され、これが THz 発振機構と強く関連していると指摘されていた。しかしながら、直接メサの温度を局所的に測定する我々の実験結果では hot spot の生成と発振現象はほとんど無関係であることが判明した。むしろ、hot spot は面内の超伝導コヒーレンスを破壊するので THz 発振には障害となっていると考えられる。防止策としては、熱伝導度の高い接着剤を用いて熱放射を促進させこと、金属電極を積極的に用いて表面からの熱の放出を促すこと、薄いメサを作成し抵抗を下げることなどの対策を検討中である。

このように、単結晶  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  メサ構造からの THz 波の発振現象の発見から5年が経過し、多くの新しい現象や実験結果が明らかにされ、その基本的な特性は、発振強度の改善の技術的方法を除いてほとんど解明できたと考えている。

#### 4. 事後評価結果

##### 4-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果(論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む)

研究代表者は、独自に開発した高温超伝導体  $\text{Bi2212}$  単結晶にメサ構造を形成し、直流電流で駆動して、高強度のコヒーレントな連続THz波が発生することを見出した。本研究は、この新たな現象をベースに実施され、メサ構造におけるTHz波の発振条件を確立、現在までに2個のメサを協調して  $30 \mu \text{W}$  程度でスペクトル線幅  $0.5 \text{GHz}$  の高強度THz波発生を実現、さらに、プロトタイプ of THz イメージング装置を試作して、種々のサンプルのイメージを提示すると共に、液体の吸収率の精密測定を提案している。

しかしながら、単一メサのさらなる高強度化および3~4個のメサの協調による  $1 \text{mW}$  級のTHz波発生など、目標とした課題が残されている。とくに、高温超伝導体メサ構造におけるTHz波の発生については、THz波発生機構は必ずしも十分解明されていない。一方で、門脇グループは良質の  $\text{Bi2212}$  単結晶を作製できる世界で唯一の研究グループであり、高温超伝導体結晶を用いたコヒーレントTHz波発生で世界をリードしていることは、評価できる。

研究成果発表は、論文数 51、引用数 456、自己引用以外 319 となっており、良くやっていると評価できる。また、海外における招待講演もあるが、一方で、現象の発見からまだ時間が経っていないこともあり、国内の THz 研究コミュニティからの認知度が低いので、様々な手法を使って THz 研究を行っている研究者に、共通の言葉で説明する努力が望まれる。」THz 研究を展開する研究者に、共通の言葉で説明する努力が望まれる。

##### 4-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト、戦略目標への貢献

数 THz 以上では量子カスケードレーザが THz 以下では半導体電子素子が電磁波発生素子として開発されており、その間を埋める素子として超伝導素子が有望な候補の一つである。高温超伝導物質を用いれば発振周波数も広帯域まで広げられる可能性があり、取り扱いも容易であるなどの特徴を持っている。課題は、この周波数帯での効率の良い大きな出力を出せる素子の実現である。多素子のコヒーレント放射を用いている本研究は成功すればサブ THz から数 THz の帯域で優位な素子となる可能性はある。しかしながら、現状では発振周波数域も限られ、出力も十分でなく、他の電子デバイスに比べ優位性を示すに至っていない。

現在、THz 波はさまざまな方法で得ることができ、こうした状況の中で、超伝導による連続 THz 発振に関する研究は世界的にも少なく、科学的インパクトの大きな研究として期待されるものの、THz 分野における本研究の位置付けを常に点検することが望まれる。今後、この研究を起点としてさらなる発展を期待したい。

#### 4-3. 総合的評価

本研究課題は、研究代表者らが発見した高温超伝導体 BSCCO メサ構造からの THz 波発振現象を基盤としたものであり、安定した THz 波の高出力・連続発振を目指している。多岐にわたる実験的研究ならびに理論的研究によって、この発振メカニズムを解明に努めるとともに、THz 波発振の条件を見出し、さらには、メサの温度を直接観察する新しいユニークな実験方法を開発し、ホットスポットの定量的評価に成功するなど、一定の成果が得られていると評価できる。一方で、高出力化については、一定の手がかりは得ているものの、中間評価の段階から、それほど大きく改善しているとは認められない。