

「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」

平成 19 年度採択研究代表者

門脇 和男

筑波大学大学院数理物質科学研究科 教授

超伝導による連続 THz 波の発振と応用

1. 研究実施の概要

テラヘルツ(10^{12} Hz)帯の電磁波は周波数がちょうど電波と光波の狭間に位置し、分子の振動数とほぼ等しいことから、基礎科学としてのみならず、化学分析、分光、医療や診断、環境、通信、薬物や爆発物の検査、製薬、食品管理など極めて広い応用が期待されている。しかしながら、古くからその重要性が認識されているにもかかわらず、今日に於いてもこの THz 帯の電磁波は簡便な発振器や高感度の検出器が無く、未開拓の領域として残されている。これをテラヘルツギャップと呼んでいる。

我々は過去 10 数年以上にわたり、高温超伝導体のジョセフソンプラズマ現象など、高温超伝導体の特徴的な固有ジョセフソン接合特性が示す様々な興味ある新しい現象について研究し、その理解を深めてきた。その結果、昨年、この固有ジョセフソン接合をメサ状に加工することで、強力な THz 波が得られることを発見した。本研究では、高温超伝導体の固有ジョセフソン接合素子を利用してこの THz 波の発振現象の解明と、その応用開発の基礎研究を行い、テラヘルツギャップを解消するコンパクトな発振器の開発と、期待される多くの有用な応用研究領域の開拓を目指すものである。

平成 19 年度は、昨年発見された、強力な THz 波の発振現象がどのような機構で発現するかを理解することに重点を置いて、まず、発振電磁波の物理的特性を明らかにした。特に、発振周波数と試料サイズの関係、強度と固有ジョセフソン接合の数の関係を明らかにし、発振の必要条件を確立した。さらに、放射される電磁波の偏光状態や電磁波の空間強度分布の測定も現在行っている。発振器として利用する場合、周波数や強度の安定性、電磁波のコヒーレンスの長さなどが問題となるため、早急に測定する予定である。また、耐久性も応用上は重要であり、現状では約 2 時間の連続発振で顕著な劣化は見られない。今後、さらに高強度の光源の作成を目指す。

最後に、この研究はジョセフソンプラズマの研究により端を発した我が国オリジナルな研究である。

2. 研究実施内容

(文中にある参照番号は 4. (1)に対応する)

研究は、THz 発振に関する実験とその理論で構成されており、互いに密接に協力し合い、研究成果をフィードバックしながら進められている。

(I) 実験研究の実施状況とその成果

昨年、強力な THz 波が高温超伝導体の高品質単結晶 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ からメサ加工によって作成された試料で確認されて以来、多くの実験がなされてきた。発振のための基本的な条件の確立、発振特性、 I - V 特性、発振強度の改善を初め(文献1~2)、強度の精密測定、フーリエ型遠赤外分光器による発振スペクトルの同定、高調波の測定、放射電磁波の偏光特性や指向性など、電磁波としての特性を明らかにしてきた(文献 2~4)。その結果、発振強度では当初の強度を1桁改善することができ、素子全体として約 $5 \mu\text{W}$ に達した。これはエネルギー放射密度に換算すると約 1 W/cm^2 (約 200 W/cm^3 に相当) であり、固体素子の発振強度としては最大である。既にある種の実用に応用可能な水準に達している。発振周波数はメサの幅 w を細かく変え、周波数を同定する実験を繰り返すことによって詳細に調べた結果、 $1/w$ に比例し、周波数 f とメサの幅の間には $f=c/n\lambda=c/2nw$ の関係が成り立つことが分かった。ここで n は超伝導体の屈折率、 λ は電磁波の波長、 c は光速である。この発振条件は試料自身がそのサイズに適合した自己共振器 (self-resonator) としての役目を果たしていることを強く示唆している。一方、発振周波数 f は印加電圧 V との間に $f=2eV/h=2evN/h$ の関係が成り立ち、個々の固有ジョセフソン接合が示す交流ジョセフソン効果が発振の源になっていることが分かる。ここで、 e は電子の素電荷、 h はプランク定数、 v は各固有ジョセフソン接合にかかる電圧、 N はメサ中に含まれる固有ジョセフソン接合の数である。 $2e/h$ は基礎物理定数のみからなり、ジョセフソン定数と呼ばれ、 483.5975 GHz/mV (国際規約として1990年1月1日以降採用されている数値) である。メサの厚さが $1\sim 1.5 \mu\text{m}$ 程度であるから、 N は $650\sim 1000$ 程度である。このように、THz 波の発振は、周波数は交流ジョセフソン効果の周波数であり、この電磁波の波長サイズに対応する自己共振器があることが必要不可欠な条件である。個々の固有ジョセフソン接合が交流ジョセフソン効果によって発振するが、すべて等価な固有ジョセフソン接合が多数存在する事から共振器の中で共鳴し合い、位相をそろえて、メサ全体が1つの巨大な固有ジョセフソン接合の役目を果たしていることが分かる。この時、電磁波の出力は固有ジョセフソン接合の総数 N の二乗に比例することが量子力学により予想されるが、実際、個々の固有ジョセフソン接合が $\sim \text{pW}$ 程度の発振出力を持つことが既に実験的に知られていることから、 N^2 倍に増幅されると μW レベルに達することが容易理解できる。このことは、固有ジョセフソン接合系特有の現象であり、THz の発振は交流ジョセフソンレーザーと考えることができる。

THz 波の試料内自己共鳴現象は、メサ内部で電磁波の定在波が生じていることを意味しており、そのモードによって遠方に放射される電磁波の放射分布や高調波成分の含み方などが異なると予想される。今後、試料の形状やサイズを変えた実験を行い、試料内部の電磁波のモードを明らかにし、より強力な電磁波を発生させる条件の確立を、以下に述べる理論との整合性を取りながら

進める。

(II) 理論研究の実施状況とその成果

ジョセフソン接合系は典型的な非線形系であるため、非線形波動などの多くの研究がジョセフソン接合系で行われてきた。しかしながら、固有ジョセフソン接合のような多層系においては、これまで研究例がほとんど無く、単一系の物理が多重系でどの様に展開するのか極めて興味深い研究対象である。従来、このような非線形多重接合系は複雑すぎて解析が困難であったが、数10～数100層の系では最近のスーパーコンピュータを用いれば解析可能であり、絶好の研究対象となる。

このような観点から、ジョセフソンプラズマとジョセフソン磁束のダイナミクスに関する研究が従来から行われてきたが、最近、THz 波の発振が実験的に確認され、発振機構の解明を理論計算で行おうとする試みがなされている(文献 5～9)。しかしながら、やはり 3 次元の実験状況をそのまま数値計算することは極めて困難で、2 次元での近似計算における結果が現在議論されている。計算結果は概ね実験と一致するが、詳細を見ると食い違いが見られる。その1つは、発振状態はリトラッピング点付近で起こるが、電磁波のモードが境界条件の取り方によって対称の場合と反対称の場合の2つの解が得られる。実験的には両者のモードによって空間に放出される電磁波の強度分布が異なると理論的には予想されていることから実験と比較することによって決められると考えられ、現在実験を行っているところである。

(III) 高品質単結晶の育成

このような THz 発振現象を支えている最も重要な部分は高品質の単結晶の存在である。厚さ 1～2 ミクロン程度のメサ試料内に不純物層があると位相のコヒーレンスが破れ発振しない。これは不純物層の混入率が約 0.1%以下でなければならない事を意味する。 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi2212)系の場合、極めて似た構造を持つ $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_{4+\delta}$ (Bi2201)と $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ (Bi2223)という相が存在し、通常の結晶では数%レベルの異相の混入は普通である。我々の結晶の場合、これが 0.1%レベル以下であることがわかっており、これが THz 発振が可能となった理由の1つと考えられている。このような高品質の単結晶育成技術の継承し、次のあたらしい現象の開拓の原動力となっていく良質の単結晶育成技術の開発に、本研究で力を注ぎたい。また、同様の極めて層状性の強い物質の単結晶の育成が可能となれば THz 発振が得られる新しい物質を開発することができ、周波数や強度など、大きく異なる可能性があるので、このような新物質の単結晶育成も視野に入れた高品質単結晶育成技術の開拓を行う(文献 10-11)。

(IV) メサ構造の作成と微細加工技術の開拓、関連する超伝導基礎物性の研究

THz 発振には微細加工技術によるメサ構造の作成が必要不可欠である。加工法としては FIB 法やイオンミリング法により行われているが、現実のメサ加工の際、形状の制御が難しく、通常は台形状のメサしかできない。現状では上底部と下底部では 10～20%も幅が異なり、この幅は厚さによって決まるから、試料幅が狭くなればなるほど平均幅に対する相対的な幅の不均一性が悪くなる事が分かった。幅が 40 ミクロン以下になると発振が極めて困難であるのはこの点が原因と考えられている。この問題を解決する為、今後、新しい加工技術の開発が必要不可欠である。

そのほか、リソグラフィー技術の改良、電極の配置、形状、付け方、試料の位置、絶縁物の付け

方、など極めて多くのパラメーターの最適化を行ってきたが今後も継続して行う必要がある。これによって、最終的には素子当たり～mW 級のメサを実現したい。

このような加工後術の開発と同時に、平行して微細加工された超伝導体の超伝導特性の測定を行っている。これは加工技術のテストと同時に、加工そのものが超伝導特性どのような影響を与えるかを調べることができ、テラヘルツ用のメサ構造に与える加工による影響も同時に調べることができ、一挙両得である。このような、周辺技術と物理特性に与える影響も、他の物性をしらべながら同時進行的に研究を進めていく(文献 12-16)。

3. 研究実施体制

(1)「門脇」グループ

①研究分担グループ長:門脇和男(筑波大学大学院、教授)

②研究項目

良質の高温超伝導体単結晶 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ をメサ加工し、実験パラメータ(メサの厚さ、形状、電極構造など)を変えた実験を行い、より強力な THz 発振が起こる条件を見いだす。また、放射される電磁波の空間強度分布の測定を、さらに詳しく行い、発振の際の電磁波モードを確定する。このことによって発振機構を解明する。これらの実験的研究は、理論的な解析結果と照合しながら進める。このような実験に耐えうる高品質の単結晶育成を行う。これと連動して同類の新しい単結晶物質の開拓を行う。(門脇、服部、八巻、橋本、川又、山口)

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 単結晶から加工された Mesa に電流を流したとき、その Mesa からテラヘルツ電磁波が発振されることが観測されているが、この発振機構を解明するための理論的研究を解析的手法および大規模数値計算で行う。それに基づいて、発振強度の強いコヒーレントなテラヘルツ波の発振素子の設計を行う。また、効率よいアンテナや伝送回路の設計を行う。(立木、福屋)

メサデバイスの作製とテラヘルツ発振特性の分光手法による評価(発振周波数、パワー、偏光特性、放射分布、時間安定性、レンズによる集光 等)をおこなう。(南、掛谷)

(2)「胡」グループ

①研究分担グループ長:胡 暁(独立行政法人物質・材料研究機構、主任研究者)

②研究項目

計算機シミュレーションにより、層状高温超伝導体面内磁場印加下でのプラズマ共鳴現象を解析する。バイアス電流によって駆動されるジョセフソン渦糸がジョセフソンプラズマを励起し、高温超伝導単結晶が作る共振器固有モードとのマッチングを通じてそれが増幅され、テラヘルツ電磁波を放出する機構の解明。(胡)

固有ジョセフソン接合のテラヘルツ波発振の数値的研究、特に接合サイズや印可磁場の変化が及ぼす影響の系統的研究。(野々村)

高品質単結晶 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ の育成と新物質開拓、および評価。(茂筑)

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

1. L. Ozyuzer, A. E. Koshelev, C. Kurter, N. Gopalsami, Q. Li, M. Tachiki, K. Kadowaki, T. Yamamoto, H. Minami, H. Yamaguchi, T. Tachiki, K. E. Gray, W. -K. Kwok, and U. Welp, “*Emission of Coherent THz Radiation from Superconductors*”, *Science* **318** (2007) 1291-1293.
2. K. Kadowaki, H. Yamaguchi, K. Kawamata, T. Yamamoto, H. Minami, I. Kakeya, U. Welp, L. Ozyuzer, A. Koshelev, C. Kurter, K. E. Gray, W. -K. Kwok, “*Direct Observation of Terahertz Electromagnetic Waves Emitted from Intrinsic Josephson Junctions in Single Crystalline $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$* ”, *Physica C* (2008), doi: 10.1016/j.physc.2007.11.090. in press.
3. K. Kadowaki, H. Yamaguchi, T. Yamamoto, H. Minami, I. Kakeya, M. Tachiki, A. E. Koshelev, L. Ozyuzer, C. Kuter, K. E. Gray, W. -K. Kwok and U. Welp, “*Bridging the THz gap with high-temperature superconductors*”, submitted to *Phys. Rev. Lett.*
4. H. Minami, I. Kakeya, H. Yamaguchi, T. Yamamoto, K. Kadowaki, M. Tachiki, L. Ozyuzer, A. E. Koshelev, C. Kurter, N. Gopalsami, Q. Li, K. E. Gray, W. -K. Kwok and U. Welp, “*Strong anisotropic emission of monochromatic tunable THz waves from superconducting intrinsic Josephson junctions*”, submitted to *Phys. Rev. Lett.*
5. T. Koyama, H. Matsumoto, M. Tachiki, M. Machida, W. -K. Kwok, U. Welp, and K. Kadowaki, “*Emission of terahertz electromagnetic waves driven by an external current*”, submitted to *Phys. Rev. Lett.*
6. M. Tachiki, “*Emission of Terahertz Electromagnetic Waves Driven by an External Current in Intrinsic Josephson Junctions*”, *Physica C* (2008). Doi:10.1016/j.physc.2007.11.083. in press.
7. Y. Nonomura, “*Effect of Sample Size in Terahertz Emission from Intrinsic Josephson Junctions in Cuprate HTSC*”, *Physica C*(2008), doi:10.1016/j.physc.2007.11.096. in press.
8. S. -Z. Lin and X. Hu, “*Possible Dynamic States in Inductively Coupled Intrinsic Josephson Junctions of Layered High- T_c Superconductors*”, to be published.
9. S. -Z. Lin, X. Hu and M. Tachiki, “*Computer simulation on terahertz emission from intrinsic Josephson junctions of high- T_c superconductors*”, *Phys. Rev.* **B 77**, 014507 (2008).

10. T. Nishio, S. Okayasu, J. Suzuki, N. Kokubo and K. Kadowaki, “*Observation of an Extended Magnetic Field Penetration in Amorphous Superconducting MoGe Films*”, Phys. Rev. **B 77** (2008) 052503(1-4).
11. N. Kokubo, T. Asada, K. Kadowaki and K. Takita, “*Peak Anomaly of Dynamic Critical Currents in NbSe₂ Crystals*”, Physica C Superconductivity and Its Applications, **463** (Oct. 1, 2007) 229-231.
12. N. Kokubo, T. Asada, K. Kadowaki, K. Takita, T. G. Sorop and P. H. Kes, “*Dynamic Ordering of Driven Vortex Matter in the Peak Effect Regime of Amorphous MoGe Films and 2H-NbSe₂ Crystals*”, Phys. Rev. **B75** (2007) 184512(1-8).
13. A. Yurgens, M. Torstensson, L. X. You, T. Bauch, D. Winkler, I. Kakeya, K. Kadowaki, “*Small-Number Arrays of Intrinsic Josephson Junctions*”, Physica C (2008), doi:10.1016/j.physc.2007.11.052. in press.
14. I. Kakeya, K. Fukui, K. Kawamata, T. Yamamoto and K. Kadowaki, “*Quantum Oscillation of the c-axis Resistivity due to Entrance of Pancake Vortices into Micro-Fabricated Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ} Intrinsic Josephson Junctions*”, Physica C (2008), doi:101016/j.physc.2007.11.064. in press.

(2) 特許出願

平成 19 年度 国内特許出願件数:2 件 (CREST 研究期間累積件数:2 件)