

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. 研究実施体制

(1)「門脇」グループ(筑波大学)

① 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)

② 研究項目

・高温超伝導体単結晶による強力な連続 THz 波発振の基礎研究、およびその応用技術開発

(2)「胡」グループ(物質・材料研究機構)

① 主たる共同研究者:胡 暁(物質・材料研究機構・WPI 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・主任研究者)

② 研究項目

・固有ジョセフソン接合系のダイナミクスと THz 発振の研究

§ 2. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(3-1)に対応する)

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り、この系を微細加工し、メサを形成することで、直流電流によって THz 帯域の電磁波を連続的に発生できる事が 2007 年、われわれによって発見された(L. Ozyuzer *et al*, Science **318** (2007) 1291.)。本研究はこの驚くべき現象の発見に基づいており、この発振現象の物理的解明を主眼として、応用までを視野に入れた幅広い研究を実施するものである。

平成23年度はこれまで行われてきた研究成果に基づき、多重直列接合している固有ジョセフソン接合がなぜコヒーレントに駆動するか、と言う最も原理的かつ基本的な問題に対し、より明確な解答を得るため、これまでメサ全体を一つの大きなジョセフソン接合と見なしたモードのみを対象としてきた発振現象の実験を、さらに一歩進め、内部ブランチを分別して励起する実験を試みた。これは固有ジョセフソン接合一つ一つがなぜ全体で一体化して同期するのか、あるいは、究極的に

はジョセフソン接合任意に一つずつ独立に励起させることができるのかどうか、そして、その際の発振強度、周波数にはどのような規則性があるのか、など、発振現象の最も根幹に関わる課題に関する理解を得るための研究を主に行った⁷。その結果、まだ途中経過ではあるが、①内部ブランチにおいても発振は起こり、発振周波数 ν は内部に入れば入るほど高くなるが、依然としてメサ全体の電圧 V

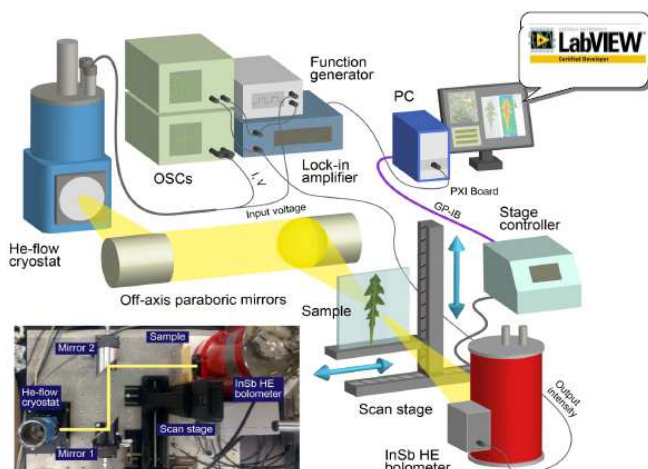


図 1. プロトタイプ THz イメージング装置の概念図

のみで決定すること、すなわち、内部ブランチでも発振周波数は交流ジョセフソン効果 $\nu = 2eV/h$ によって完全に決定されていること、②発振強度は発振周波数 ν がメサ内部で励起される電磁波の固有モードと一致するとき強く増強されるが²、それ以外でも強度は弱いが発振はおこること^{3,5}。従って、このことから発振は、強弱はあるが電圧を制御することでほぼ連続的に広範囲な周波数帯域を発振させることが可能であることが分かった。場合によっては数 100 GHz を連続的に周波数可変にできる事が分かった⁷。これはメサの形状や作成法によっても異なるが、具体的には矩形メサで幅が $50 \sim 80 \mu\text{m}$ 、長さ $L \approx 400 \mu\text{m} \gg \lambda_c$ の場合、発振強度は共鳴モード周波数で大変強く、それを外れると大きく低下する、いわゆる鋭い同調現象が見られる(共鳴における Q 値が高いがせいぜい Q 数 $10 \sim 100$ 程度)ことが分かった^{5,6,7}。③様々な形状に対する発振周波数を求めることによってメサの形状と共鳴周波数の関係は平板型ストリップアンテナの理論でほぼ良く説明できることが分かった⁸。また、必ずしもこのパッチアンテナ理論から得られるモードのみでなく均一モードも場合によっては重要な寄与をする。また、メサが乗っている基板の誘電率や形状にも依存し、基板のエッジ効果が無視できないことも分かってきた⁸。メサ自体が空洞として動作しており、そのメサの空洞共振器としての性能、すなわち、 Q 因子がそのまま発振強度に反映されると考えられる^{2,5}。

ところで、発振の線幅は発振の機構を理解する上でも極めて重要であるが、その情報は明確なものはいまだ得られていなかった。今回、VD 社から購入したハーモニックミキサーを用いて線幅の測定を試みた。その結果、矩形メサの場合、約 0.5 GHz であった(これまで分光器の測定から得られていた線幅は約 12 GHz であり、分解能の限界値であった)⁵。この値はまだ測定例が一例しかなく本質的な値かどうか不明な点もあるが、コヒーレントな発振の固有幅とすると広すぎると思われる。どのような物理的な機構がこの線幅を決めているのか今後明らかにする必要がある。

一方、THz 波を用いたイメージング応用の研究も行った⁶。図1はプロトタイプのイメージング装置の概略図、図 2 にはそれを用いて測定された液体(水とエチルアルコール)の吸収係数の比較を示す。

このように、THz 波の発振現象をより深く理解することができ、従って、より精密に発振現象を制御する方法が得られたことは今後、さらに強力な発振を得るための具体的な方法を考える上で重要である。現在その方法を実験的に模索中である。

高温超伝導体 BSCCO 多重ジョセフソン接合系によるテラヘルツ電磁波発振の基本原理解は交流ジョセフソン効果になっていることが分かってきたが、大きな直流エネルギーをテラヘルツ電磁波に変換する機構の理論的理解はまた十分に確定していない。強力な電磁波発振を得るためには、1千個程度の接合に亘って超伝導位相をコヒーレントに制御する必要があり、そのダイナミクスの解明が急務である。このためにはナノスケールに積層された超伝導層間の誘導相互作用及び超伝導位相間の非線形結合(=サインゴルドン方程式)を解析計算及び大規模数値計算により調べることが必要である。この研究を通じて、新規な超伝導位相非線形ダイナミクス状態を解明し、強力なテラヘルツ電磁波発振の最適条件を確立する。また、今までに蓄積してきた BSCCO 高温超伝導単結晶育成の技術をさらに発展させ、より強力なテラヘルツ発振の土台を提供する¹⁴。

高温超伝導固有ジョセフソン接合系で大きな直流エネルギーをテラヘルツ電磁波に変換するメカニズムとして特異な超伝導位相のパイ・キック状態の存在が理論的に解明された。一方で、放射エネルギーの大きさは多重ジョセフソン接合系内部のジョセフソンプラズマ共鳴の強さと表面の透過係数で決まり、この二つの相反するファクターの最適化がカギとなる。また、実験で用いられるメサ構造は小さい放射面積しか持たないことも全放射エネルギーを小さくしている。今年度は、放射面積を大きくするため結晶c軸方向に長い BSCCO 円柱型単結晶を考えた。単結晶を誘電体で囲めば共振器になり、大きなジョセフソンプラズマ振動を生む共振器共鳴が得られる。我々は大きな放射エネルギーを得る最適な誘電率を決定することに成功し、得られる最大放射エネルギーの評価を得た。最大エネルギーの評価式から理想な BSCCO 単結晶を選ぶ指針も示唆されている。この研究成果について現在論文を執筆しているところである。

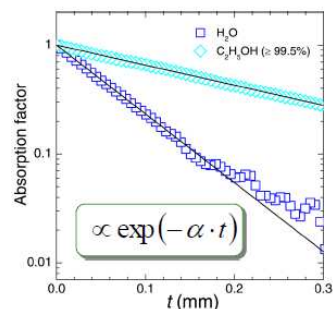


図2. 水とエチルアルコールの吸収係数の比較

§ 3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. A. E. Koshelev, A. I. Buzdin, I. Kakeya, T. Yamamoto and K. Kadowaki, “Fluctuating Pancake Vortices Revealed by Dissipation of the Josephson Vortex Lattice”, Phys. Rev. B vol. 83 (June 27th, 2011) 224515(1-11) (DOI: 10.1103/PhysRevB.83.224515).
2. Takanari Kashiwagi, Kazuhiro Yamaki, Manabu Tsujimoto, Kota Deguchi, Naoki Orita, Takashi Koike, Ryo Nakayama, Hidetoshi Minami, Takashi Yamamoto, Richard A. Klemm, Masashi Tachiki, and Kazuo Kadowaki, “Geometrical full-wavelength resonance mode generating terahertz waves from a single crystalline $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ rectangular mesa”, J. Phys. Soc. Jpn. Vol. 80 (Aug. 22nd, 2011) 094709(1-8) (DOI: 10.1143/JPSJ.80.094709).
3. T. M. Benseman, A. E. Koshelev, K. E. Gray, W. -K. Kwok, U. Welp, K. Kadowaki, M. Tachiki and T. Yamamoto, “Tunable terahertz emission from $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesa devices”, Phys. Rev. B vol. 84 (August 24th, 2011) 064523 (DOI: 10.1103/PhysRevB.84.064523).
4. J. Mirković, T. Kashiwagi, T. Saito, T. Yamamoto and K. Kadowaki, “Geometry Dependent Resistivity Behavior in Mesoscopic $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ Single Crystals”, Physica C vol. 471 (November 2011) 787-789, (DOI: 10.1016/j.physc.2011.05.055).
5. T. Kashiwagi, M. Tsujimoto, T. Yamamoto, H. Minami, K. Yamaki, K. Delfanazari, K. Deguchi, N. Orita, T. Koike, R. Nakayama, T. Kitamura, M. Sawamura, S. Hagino, K. Ishida, K. Ivanovic, H. Asai, M. Tachiki, R. A. Klemm and K. Kadowaki, “*High Temperature Superconductor Terahertz Emitters: Fundamental Physics and Its Applications*”, Jpn. J. Appl. Phys. 51 (online published December 27, 2011, January, 2012) 010113. (JJAP special issue) (DOI: 10.1143/JJAP.51.010113).
6. H. Minami, M. Tsujimoto, T. Kashiwagi, T. Yamamoto and K. Kadowaki, “*Terahertz Radiation Emitted from Intrinsic Josephson Junctions in High- T_c Superconductor $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$* ”, The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE) Trans. E95-C (No. 3) (March 2012) 347-354, (DOI: 10.1587/transele.E95.C.1)

7. Manabu Tsujimoto, Takashi Yamamoto, Kaveh Delfanazari, Ryo Nakayama, Takeo Kitamura, Masashi Sawamura, Takanari Kashiwagi, Hidetoshi Minami, Masashi Tachiki and Kazuo Kadowaki and Richard A. Klemm, "Broadly Tunable Sub-terahertz Emission from Internal Branches of the Current-Voltage Characteristics of Superconducting $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ Single Crystals", *Phys. Rev. Lett.* vol 108 (March 9th, 2012) 107006-(1-5). (DOI:10.1103/PhysRevLett.108.107006).

8. Hidehiro Asai, Masashi Tachiki and Kazuo Kadowaki, "Three-Dimensional Analysis of Terahertz Radiation Emitted from Intrinsic Josephson Junctions with Hot Spots", *Phys. Rev. B* vol. 85 (February 27th, 2012) 064521, (DOI: 10.1103/PhysrevB.85.064521).

9. Z. Wang and X. Hu, "Interference and Switching of Josephson Current Carried by Nonlocal Spin-Entangled Electrons in a SQUID-like System with Quantum Dots", *Phys. Rev. Lett.* vol. 106, 037002 (2011), (DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.037002). (selected as cover picture)

10. S.-Z. Lin and X. Hu, "Radiation of Terahertz Electromagnetic Waves from Build-in Nano Josephson Junctions of Cuprate High- T_c Superconductors", *J. of Nanosci. and Nanotechno.*, vol. 11, 2916 (2011), (DOI: <http://dx.doi.org/10.1166/jnn.2011.3907>).

11. S.-Z. Lin and X. Hu, "Vortex States and Phase Diagram of Multi-component Superconductors with Competing Repulsive and Attractive Vortex Interactions", *Phys. Rev. B* vol. 84, 214505 (2011), (DOI: 10.1103/PhysRevB.84.214505).

12. X. Hu and Z. Wang, "Stability and Josephson Effect of Time-Reversal Symmetry Broken Multi-Component Superconductivity induced by Frustrated Inter-Component Couplings", *Phys. Rev B* vol. 85, 064516 (2012), (DOI: 10.1103/PhysRevB.85.064516).

13. W.-P. Cao, M.-B. Luo and X. Hu, "Scaling Behaviors and Novel Creep Motions of Flux Lines under AC Driving with Point-like Pins", *New J. Phys.* vol.14, 013006 (2012), (DOI: 10.1088/1367-2630/14/1/013006).

14. S.-Z. Lin, X. Hu and L. Bulaevskii, "Synchronization in a one-dimensional array of point Josephson junctions coupled to a common load", *Phys. Rev. B* vol. 84, 104501

(2011), (DOI: 10.1103/PhysRevB.84.104501).

15. S. Ooi, T. Mochiku, K. Hirata: “Antidot diameter dependence of matching effect in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+y}$ with antidot array”, *Physica C* vol. 471, 804-807 (2011), (DOI: 10.1015/j.physc.2011.05.060).
16. T. Machida, T. Kato, H. Nakamura, M. Fujimoto, T. Mochiku, S. Ooi, A. D. Thakur, H. Sakata, K. Hirata, “Quantum interference of impurity bound states in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}(\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x)_2\text{O}_{8+\delta}$ probed by scanning tunneling spectroscopy”, *Phys. Rev. B* vol. 84, 064501 (2011), (DOI: 10.1103/PhysRevB.84.064501).
17. S. -Z. Lin and X. Hu, “Massless Leggett Mode in Multi-band Superconductors with Time-Reversal-Symmetry Breaking”, *Phys. Rev. Lett.* in press.

(3-2) 知財出願

① 平成 23 年度特許出願件数(国内 1件)

② CREST 研究期間累積件数(国内 5件)