

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

周波数がテラヘルツ帯の電磁波は、基礎科学はもとより、応用上特に重要であることが古くから認識されているにもかかわらず、簡便な発振手段や検出器が無く、ほとんど未開の状態である(テラヘルツギャップ)。超伝導は交流ジョセフソン効果を用いれば  $\nu=2eV/h$  ( $=483.5979$  GHz/mV,  $\nu$  は発振周波数、 $V$  はジョセフソン接合両端の電圧、 $e$  は電子の電荷、 $h$  はプランク定数)の関係式より、比較的容易にマイクロ波帯域の電磁波を得ることができることから、多くの研究がこれまで成されてきた。しかしながら、従来の金属系超伝導体では超伝導転移温度  $T_c$  が低く、動作周波数の限界が数 100 GHz とテラヘルツ帯域をカバーすることはできない。

これに対し、高温超伝導体では従来の金属系超伝導体よりギャップエネルギーが 10 倍以上高く、しかも  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  系ではジョセフソン接合が結晶の単位胞内に内在していることが知られており(固有ジョセフソン接合)、これを利用すればテラヘルツ帯域の発振素子や検出器の作成が可能であることから、多くの研究がなされてきたがこれまで実現に至らなかった。

我々は、2007 年 6 月、マイクロワット級の電磁波放射現象が単結晶  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  の大型メサを直流駆動することによって実現できることを明らかにした。この発振は連続であり、発振強度は単一ジョセフソン接合の場合より 6 桁程度強度が強く、直線偏光した鋭い輝線スペクトルを持つ電磁波であること、さらにはその発振機構についてこの 3 年あまりの間、解明を行ってきた。

平成 22 年度は発振機構の解明のため、電磁放射パターン測定を行い、ジョセフソンプラズマの励起状態モードの解析を、 $I$ - $V$  特性の最外部ブランチ及び内部ブランチで行い、内部ブランチへ行けば行くほど発振周波数が大幅に高くなる新しい現象を見いだした。この理由は、ジュール発熱による熱力学的な非平衡状態と発振に寄与する非線形状態が関与するものと推測されるが、その詳細な機構は今後の研究にゆだねられている。また、放射特性の測定から、様々な形状のメサ内部に発生するジョセフソンプラズマモードを同定することが可能となり、理論的な予想と良く一致することがわかった。

一方、このような新しい THz 帯域への電磁波の応用の取り組みとして、本年度はイメージングのための装置開発に着手した。この THz 波は単色かつ連続光であり、強度が強いことから、極めて鮮明かつ迅速にイメージング可能である点が特徴である。プロトタイプの装置を作成し、予備的実験を開始し、良好な結果を得ている。

これまで 1/4 世紀の間、高温超伝導体の膨大な研究がなされたにもかかわらず、実用化されている技術は無い。これが高温超伝導体の初の実用化となることが期待されている。

## § 2. 研究実施体制

### (1)「筑波大学」グループ

① 研究分担グループ長: 門脇和男 (筑波大学大学院数理物質科学研究科、教授)

#### ② 研究項目

- ・空間放射パターンの測定とジョセフソンプラズマモードの同定
- ・ $I$ - $V$ 特性における内部ブランチからの発振特性の解明
- ・非線形性、非平衡状態を考慮した THz 波発振機構の理論的解明
- ・発振特性の外部磁場効果
- ・THz 波発振強度の改善(アレイ化、単独メサなど)
- ・ジュール熱による発熱が発振に与える影響の解明
- ・イメージング応用化技術の開発

### (2)「物質・材料研究機構」グループ

① 研究分担グループ長: 胡 暁 (物質・材料研究機構、筑波大学教授)

#### ② 研究項目

- ・固有ジョセフソン接合内の発熱の  $I$ - $V$ 特性への影響の解明
- ・THz電磁波発振の最適条件の解明
- ・ジョセフソン接合アレイに於ける共鳴発振の同期ダイナミクスの解明
- ・固有ジョセフソン接合系の THz波増幅効果の解明

## §3. 研究実施内容

THz 波発振の初期の実験結果から、矩形メサに於いてはメサの幅  $w$  が発振周波数  $f$  と密接な関係があり、 $f = \omega / 2\pi n w$  と表すことができることが知られていた ( $n$  は超伝導体の内部における屈折率)。この関係は、メサの形状が電磁波に対して空洞共振器として動作していることを示唆している。従って、これまで、メサの幾何学的な形状と発振周波数との関係を詳細に調べるため、長さを変えた矩形(正方形を含む)や、様々な半径の円板状試料で実験を重ねてきた。その結果、円盤の場合も同様に空洞共振条件が成り立ち、発振周波数は  $f = \chi_{11} \omega / 2\pi n a$  (ここで基本波に対しては  $\chi_{11} = 1.841$ ,  $\omega$  は真空中の光速、 $n$  は屈折率で  $n = 4.2$ ,  $a$  は円盤の半径)となることは放射強度の角度依存性、分光測定結果などから、明らかにしてきたところである。また、その結果より、THz 発振の原動力を担っているのは交流ジョセフソン効果そのものであることを直接実証することができた。

平成 22 年度はこの流れをさらに進め、矩形(正方形を含む)メサを典型的な例にとり、発振周波数と空洞共振効果はより一般的な関係があることを明らかにした。矩形メサで  $\text{TM}(m, p)$  モードの場合、共鳴周波数  $\nu_{m, p}$  は  $m, p$  を整数として一般的に

$$v_{m,p} = \frac{c_0}{2\pi n} \sqrt{\left(\frac{\pi m}{w}\right)^2 + \left(\frac{\pi p}{L}\right)^2} \quad (1)$$

と表される。 $L$ と $w$ はそれぞれ矩形メサの長さと幅である。これを少し変形すると

$$\left(\frac{wf}{c^*}\right)^2 = (\pi m)^2 + (\pi p)^2 \left(\frac{w}{L}\right)^2 \quad (2)$$

と表すことができる。この関係は、様々な大きさの矩形メサについて縦軸を $(wf/c^*)^2$ 、横軸に $(w/L)^2$ をとると図 1 のようになる。矩形メサにおいて励起可能なすべてのモードはこの図の中のいずれかの直線上にあることを示している。白丸印はこれまで得られた実験値をプロットしたものである。この図から、特徴的なことを箇条書きにする。①矩形メサの場合、 $w/L \leq 0.4-0.5$  ではほとんどの場合、TM(1,0)モードしか観測されない。② $w/L$  がほぼ 0.5 以上であると $(m,p)$ の両者が混じったモードが観測されるようになる。③この②の性質は低温側で観測され、多くの場合、周波数は強い温度依存性を示すようになる。④ $L$ が約 150  $\mu\text{m}$  以上のメサでは $p=0$ 以外のモードは観測されていない。そもそも電磁波のモードのみから考えれば $L > w$ であればTM(0,1)が基底状態であるから(0,1)モードが励起されて良いはずなのに、実際にはこのモードは観測されず、代わりに(1,0)モードが観測される。これは一見、矛盾するように見えるが、そもそも発振周波数 $f_{m,p}$ はジョセフソンプラズマ周波数 $f_{JP}$

$$f_{JP} = \frac{c_0}{2\pi\sqrt{\epsilon}\lambda_c} = \frac{c_0}{2\pi\lambda_c} \quad (3)$$

以上でなければならず、そのためには $L < \pi\lambda_c$ である必要がある。過去のジョセフソンプラズマ吸収実験から $\lambda_c = 56 \mu\text{m}$ であるから( $f_{JP} \sim 200 \text{ GHz}$ より)、結局、 $L \sim 170 \text{ mm}$ が得られ、観測結果④の理由が同時に得られる。このことは、基本モードで発振するためには矩形メサの長さがどちらかがこの値より短い必要があり、さもなければ発振モードは励起されないことになる。あるいは、励起できるモードがあるとすれば基本波ではなく、より高次のモードであることがわかる。観測事実②は、 $w$ と $L$ が近い値になるとどちらのモードが立つ条件もそれほど変わらない状況が発現することから、 $(m,p)$ 両者が混じったモードが立つことも自然に理解できる。また、この様な状況下では

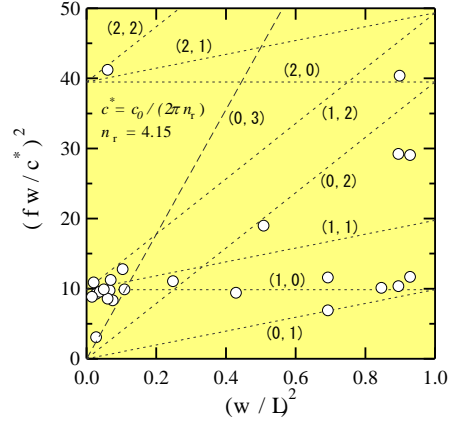


図 1. 矩形メサの発振モードの多様性

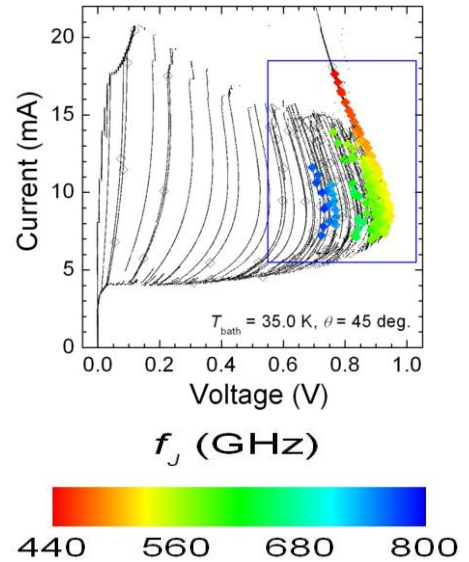


図 2. 内部ブランチを示す  $I$ - $V$  曲線上での THz 波領域の発振。周波数はカラーコード化してある。

励起できるモードがエネルギー的に近い領域に複数あり、また、空洞としての役目が不明確になることから超伝導パラメーターの温度依存性と同様に発振周波数が温度依存性を持つことが容易に推測できる。この様な場合、発振強度は通常、あまり強くないことも理解できる。この結果は論文として現在、投稿中である[40]

この様に、発振条件の一つとしてメサの空洞効果と周波数の関係がほぼ解明できたと考えられるが、数多くの実験の中で、必ずしも発振周波数がこの様な空洞モードでは説明できない場合もあった。この理由は明らかでない場合が多いが、一つだけ際だったことは、 $I$ - $V$  曲線の内部ブランチでの発振が空洞共振器モードでは説明がつかないという発見である。この内部モードの問題を現在中心的研究課題として取り上げている。途中経過であるが、これまで明らかになっている内部ブランチに関する主要な現象を以下に述べる。

内部ブランチでは発振の性格が最外部の発振モードと以下の点で大きく異なる。①周波数が可変なことから空洞共振モードだけでは説明できないが、交流ジョセフソン効果を満たし、そのため周波数は電圧のみで規定され、それを連続的に変化することで周波数も連続的に変化する。すなわち、

$$f = \frac{2eV}{hN} = \frac{2e}{h}v \quad (4)$$

を満たしている。ここで  $V$  は接合全体に印加されている電圧、 $N$  は発振に寄与している接合数、 $v$  は接合 1 層にかかる電圧で  $V/N$  を表し、 $e$  と  $h$  はそれぞれ電子の電荷の絶対値、及びプランク定数である。②最外部から内部に入り込むにつれ発振周波数は急速に増加する(図 2 のカラーコード参照)。③内部ブランチの深い領域では次第に発振は起こりにくくなること。④同一ブランチ内でも電圧と共に発振周波数を 10-15%程度、変えることができる。⑤内部ブランチでの発振は同一ブランチでは同一周波数で発振する(周波数の再現性)、などである。これらの現象のほとんどはまだ十分に理解されているとは言い難いが、①及び②は  $I$ - $V$  のブランチを調整することで発振周波数をこれまでよりもっと大幅に変更できることを意味しおり、応用上は大変重要な意味を持つと考えられる。すなわち、図 2 の例の場合は 400 GHz 程度から 900 GHz 程度までの広範な領域を連続的に発振できることを示している。発振周波数は内部ブランチほど高いが、そもそも、最外部と内部ブランチとの差とは一体どのような物理的な違いに対応しているのだろうか。また、発振周波数の上限がどのような条件に律則されているのだろうか？ 大変興味深い今後の研究課題である。これらの実験結果は現在、*Nature* 誌に投稿中である[41]。

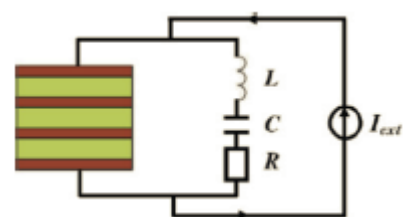


図 3 近接場を有効的なインダクタンス  $L$ 、静電容量  $C$ 、抵抗  $R$  まで考慮し、より現実に近い状況を記述する新しい理論モデルの概念図。

一方、理論的な解析も大きく進歩し、具体的な応用例を計算できる状況になってきた。たとえば、立木等は発振素子のみでなく、その周囲(near field)までを含め、この効果を有効的なインダクタンス  $L$ 、静電容量  $C$ 、抵抗  $R$  に置き換えた有効理論を構築した[36]。これによって、周囲の状況ま

で取り入れたより現実的な系を取り扱うことができる手始めとなるものと期待される。実験で使用されているメサのサイズで計算される発振出力はこの場合、約  $500 \mu\text{W}$  であり、現実に変に近い値が得られている。しかしながら、これまでのところ、温度効果は全く取り入れられていないことから、今後は有限温度で熱的な非平衡状態を考慮したより現実的な有効理論の構築を行う予定である。

また、固有ジョセフソン接合を単なる発振器としてのみならず、より積極的に能動素子として利用できる可能性も指摘されている。図 4. は左側から入射する微弱な THz 帯域の電磁波を、固有ジョセフソン素子で受信し増幅し、右側に放出する、増幅素子の概念図である。Lin と Hu はこの増幅の可能性を数値計算により詳細に調べた結果、丁度、空洞共振器の周波数と一致した電磁波  $S_{in}$  が入射すると強度が  $S_{out}$  の電磁波が放出され、 $10\log(S_{out}/S_{in})=14 \text{ dB}$  程度の増幅が現実的なパラメーターのもとで具体的に実現できることが予想されている[3]。THz 帯域における増幅器はこれまで存在しないので大変重要と考えられ、今後、実験的な検証結果が期待されている。

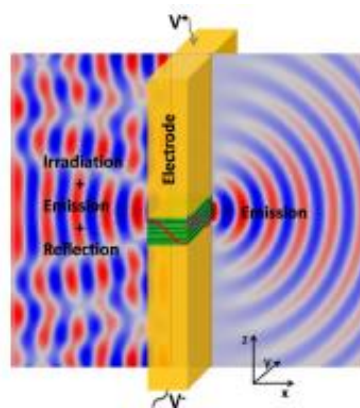


図 4. THz 帯域の増幅器の概念図  
(説明は本文参照)。

## §4. 成果発表等

### (4-1) 原著論文発表

#### ●論文詳細情報

- [1]. B. Liu and X. Hu: “Impurity induced states on the superconducting interface  $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ ”, Phys. Rev. B vol.81, 144504 (April 13<sup>th</sup>, 2010) (DOI:10.1103/PhysRevB.81.144504).
- [2]. X. Hu and S.-Z. Lin: “Phase dynamics in a stack of inductively coupled intrinsic Josephson junctions and terahertz electromagnetic radiation”, Supercond. Sci. Technol. **23**, 053001 (May, 2010), (doi:10.1088/0953-2048/23/5/053001).
- [3]. S.-Z. Lin and X. Hu: “Response and amplification of terahertz electromagnetic waves in intrinsic Josephson junctions of layered high- $T_c$  superconductor”, Phys. Rev. B **82**, 020504(R) (July 12<sup>th</sup>, 2010), (DOI:10.1103/PhysRevB.82.020504).
- [4]. Manabu Tsujimoto, Kazuhiro Yamaki, Kota Deguchi, Takashi Yamamoto, Takanari Kashiwagi, Hidetoshi Minami, Masashi Tachiki, Kazuo Kadowaki and Richard A. Klemm, “Geometrical Resonance Conditions for THz Radiation from the Intrinsic Josephson Junctions in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ”, Phys. Rev. Lett. **105** (July 15<sup>th</sup>, 2010) 037005, (DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.037005).
- [5]. Richard A. Klemm and Kazuo Kadowaki, “Angular Dependence of the Radiation Power of a Josephson STAR Emitter”, J. Supercond. Nov. Magn. **23** (July 2010)

- 613-616, (DOI: 10.1007/s10948-010-0719-7).
- [6]. S V Chong, S Hashimoto and K Kadowaki, “*Upper critical fields and critical current density of  $BaFe_2(As_{0.68}P_{0.32})_2$  single crystal*”, Solid State Commun., **150** (July 2010) 1178-1181, (DOI: 10.1016/j.ssc.2010.04.019).
- [7]. Y. Nonomura, “*THz Wave Emission from Intrinsic Josephson Junctions Controlled by Surface Impedance*”, J. Supercond. Novel Magn. **23**, 601 (July, 2010), (DOI 10.1007/s10948-010-0690-3).
- [8]. Richard A. Klemm and Kazuo Kadowaki, “*Output from a Josephson stimulated terahertz amplified radiation emitter*”, J. Phys. Condens. Matter **22** (22 September 2010) 375701(1-15), (DOI: 10.1088/0953-8984/22/37/375701).
- [9]. S.-J. Hu and X. Hu: “*Half-Metallic Antiferromagnet  $BaCrFeAs_2$* ”, J. Phys. Chem. C **114**, 11614 (July 8<sup>th</sup>, 2010), (DOI: 10.1021/jp102725p).
- [10]. H.-Q. Yin, W. Li, X. Hu and R.-B. Tao: “*Coherent transport of armchair grapheme constrictions*”, J. Appl. Phys. **107**, 103706 (October, 2010), (doi:10.1063/1.3391273).
- [11]. R. Yoshizaki, H. Ikeda, and K. Kadowaki, “*Properties of Ca-doped  $Bi_{2+x}Sr_{2-x}CuO_{6+\delta}$* ”, Physica C: Superconductivity **470** (December 2010) S193-S194, “*Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity*”, held at Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan, Sept. 7-12, 2009, (DOI: 10.1016/j.physc.2009.10.048).
- [12]. M. Tsujimoto, K. Yamaki, T. Yamamoto, H. Minami, and K. Kadowaki, “*Terahertz radiation generated from cylindrical mesas of  $Bi2212$* ”, Physica C: Superconductivity **470** (December 2010) S779-S781, “*Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity*”, held at Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan, Sept. 7-12, 2009, (DOI: 10.1016/j.physc.2009.10.035).
- [13]. Naoki Orita, Hidetoshi Minami, Takashi Koike, Takashi Yamamoto, and Kazuo Kadowaki, “*Synchronized operation of two serially connected  $Bi2212$  emitters*”, Physica C: Superconductivity **470** (December 2010) S786-S787 “*Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity*”, held at Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan, Sept. 7-12, 2009, (DOI: 10.1016/j.physc.2010.01.051),.
- [14]. Jovan Mirkovic, Takashi Saito, Takanari Kashiwagi, Itsuhiro Kakeya, Yuimaru Kubo, Takashi Yamamoto, Ahmet Oral, and Kazuo Kadowaki, “*Vortex phases in magnetic fields near ab-plane in  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$  single crystal*”, Physica C: Superconductivity **470** (December 2010) S790-S792, “*Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity*”, held

- at Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan, Sept. 7-12, 2009, (DOI: 10.1016/j.physc.2009.11.095).
- [15]. Jovan Mirkovic, Takanari Kashiwagi, Takashi Saito, Takashi Yamamoto, and Kazuo Kadowaki, “*Crossing vortex lattice and lock-in vortex state in mesoscopic  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  crystal*”, *Physica C: Superconductivity* **470** (December 2010) S793-S794, “*Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity*”, held at Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan, Sept. 7-12, 2009, (DOI: 10.1016/j.physc.2010.01.009).
- [16]. Kazuhiro Yamaki, Manabu Tsujimoto, Takashi Yamamoto, Hidetoshi Minami, and Kazuo Kadowaki, “*Magnetic field effects on THz radiation from rectangular shape  $\text{Bi}2212$  IJJ’s*”, *Physica C: Superconductivity* **470** (December 2010) S804-S805, “*Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity*”, held at Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan, Sept. 7-12, 2009, (DOI: 10.1016/j.physc.2010.01.035).
- [17]. Hidetoshi Minami, Naoki Orita, Takashi Koike, Takashi Yamamoto, and Kazuo Kadowaki, “*Continuous and reversible operation of  $\text{Bi}2212$  based THz emitters just below  $T_c$* ”, *Physica C: Superconductivity* **470** (December 2010) S822-S823, “*Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity*”, held at Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan, Sept. 7-12, 2009, (DOI: 10.1016/j.physc.2010.01.016).
- [18]. T. Nishio, R. B. G. Kramer, V. H. Dao, L. F. Chibotaru, N. D. Zhigadlo, and J. Karpinski, “*Inhomogeneity of initial flux penetration in  $\text{MgB}_2$  single crystals*”, *Physica C: Superconductivity* **470** (December 2010) S932-S934, “*Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity*”, held at Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan, Sept. 7-12, 2009, (DOI: 10.1016/j.physc.2009.10.091).
- [19]. M.-B. Luo and X. Hu, “*Dynamics of Bragg glass in high- $T_c$  superconductors near depinning transition*”, *Physica C* **470**, S890 (December, 2010), “*Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity*”, held at Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan, Sept. 7-12, 2009, (doi:10.1016/j.physc.2010.01.050).
- [20]. B. Liu and X. Hu, “*Local electronic structures in electron-doped cuprates with coexisting orders*”, *Physica C* **470**, S197 (December, 2010), “*Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity*”, held at Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan, Sept. 7-12, 2009, (doi:10.1016/j.physc.2009.10.154).

- [21]. S.-Z. Lin and X. Hu, "*Stability of the kink state in a stack of intrinsic Josephson junctions*", Physica C **470**, S201 (December, 2010), "*Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity*", held at Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan, Sept. 7-12, 2009, (doi:10.1016/j.physc.2009.11.042).
- [22]. M.-B. Luo and X. Hu, "*Creep of driven flux lines in type-II superconductors*", J. Supercond. Novel Magn. Vol. **23**, 1055 (August, 2010), (DOI 10.1007/s10948-010-0757-1).
- [23]. S.-Z. Lin and X. Hu, "*Kink state in a stack of intrinsic Josephson junctions in layered high- $T_c$  superconductors and terahertz radiation*", J. Supercond. Novel Magn. Vol. **23**, 1025 (2010).
- [24]. 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 (January 19<sup>th</sup>, 2011), (DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.037002).
- [25]. Y. Hata, K. Watanabe, T. Mochiku, H. Yasuoka, "*Crystal Structure and Superconductivity of  $FeSr_2YCu_2O_{6+y}$  superconductor*", Physica C **470**, S92 (December, 2010), "*Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity*", held at Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan, Sept. 7-12, 2009, (doi: 10.1016/j.physc.2009.11.168).
- [26]. T. Mochiku, Y. Hata, T. Wuernisha, N. Igawa, A. Hoshikawa, T. Ishigaki, H. Yasuoka, K. Hirata, "*Low Temperature Structure of  $FeSr_2YCu_2O_{6+\delta}$  magnetic superconductor*", Physica C **470**, S158 (December, 2010), "*Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity*", held at Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan, Sept. 7-12, 2009, (doi:10.1016/j.physc.2009.12.047).
- [27]. T. Tamegai, T. Tominaga, D. Naito, Y. Nakajima, S. Ooi, T. Mochiku, K. Hirata, "*Magneto-Optical Observations of Vortex Penetration into  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+y}$  with Periodic Pinning Potentials*", Physica C **470**, S784 (December, 2010), "*Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity*", held at Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan, Sept. 7-12, 2009, (doi:10.1016/j.physc.2009.12.032).
- [28]. S. Ooi, T. Mochiku, K. Hirata, "*Fractional Matching Effect of Vortices in  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+y}$  with Square Lattice of Antidots*", Physica C **470**, S868 (December, 2010), "*Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity*", held at Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan, Sept.



- 7-12, 2009, (doi:10.1016/j.physc.2009.11.170).
- [29]. T. Machida, S. Ooi, M. Tachiki, T. Mochiku, T. Kato, H. Sakata, K. Hirata, “*Microwave Responses on Locally Modified  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$  by Near-Field Microwave Microscope*”, Physica C **470**, S1021 (December, 2010), “*Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity*”, held at Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan, Sept. 7-12, 2009, (doi:10.1016/j.physc.2009.12.031).
- [30]. T. Machida, T. Kato, H. Nakamura, M. Fujimoto, T. Mochiku, S. Ooi, A. D. Thakur, H. Sakata, K. Hirata, “*Disappearance of Zinc Impurity Resonance in Large-Gap Regions of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  Probed by Scanning Tunneling Spectroscopy*”, Phys. Rev. B **82**, 180507 (November 10<sup>th</sup>, 2010), “*Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity*”, held at Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan, Sept. 7-12, 2009, (DOI:10.1103/PhysRevB.82.180507).
- [31]. Y. Nonomura, “*Numerical study on effects of surface impedance and external magnetic fields in THz wave emission from intrinsic Josephson junctions*”, Physica C **470**, S824 (December, 2010), (doi:10.1016/j.physc.2010.01.040), “*Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity*”, held at Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan, Sept. 7-12, 2009.
- [32]. H.-Q. Yin, W. Li, X. Hu and R.-B. Tao: “*Coherent transport of armchair grapheme constrictions*”, J. Appl. Phys. **107**, 103706 (October, 2010), (doi:10.1063/1.3391273).
- [33]. S. Ooi, T. Mochiku, K. Hirata, “*Influence of Flat Milling on Vortex Matching Effect in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+y}$  with Antidot Array*”, Physica C **470**, (November, 2010) 1115.
- [34]. S. V. Chong, S. Hashimoto, H. Yamaguchi and K. Kadowaki, “*Neodymium-Doping Induced Superconductivity in 1111-SrFeAsF Iron-Pnictide System*”, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, **23** (December 2010) 1479-1484 (DOI 10.1007/s10948-010-0799-4).
- [35]. Richard A. Klemm, Erica R. Laberge, Dustin R. Morley, Takanari Kashiwagi, Manabu Tsujimoto and K. Kadowaki, “*Cavity mode waves during terahertz radiation from rectangular  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  mesas*”, J. Phys: Condens. Matter **23** (19 January 2011) 025701(1-11), (DOI: 10.1088/0953-8984/23/2/025701).
- [36]. Masashi Tachiki, Krsto Ivanovic and K. Kadowaki, “*Emission of terahertz electromagnetic waves from intrinsic Josephson junction arrays embedded in resonance LCR circuits*”, Phys. Rev. B **83** (19 January 2011) 014508-1, (DOI: 10.1103/PhysRevB.83.014508).
- [37]. Kazuhiro Yamaki, Manabu Tsujimoto, Takashi Yamamoto, Akio Furukawa,

Takanari Kashiwagi, Hidetoshi Minami, and Kazuo Kadowaki, “*High-power terahertz electromagnetic wave emission from high-Tc superconducting Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+δ</sub> mesa structures*”, Optics Express **19** (No. 4)(February 14, 2011) 3193-3201.

- [38]. 辻本学、門脇和男、「高温超伝導体の固有ジョセフソン接合系におけるテラヘルツ波発振現象」、日本物理学会誌第 66 巻 (Vol. 66), No.1 (1 月号), (January, 2011) 46-50.
- [39]. S. -Z. Lin and X. Hu, “*Radiation of Terahertz Electromagnetic Waves from Build-in Nano Josephson Junctions of Cuprate High-Tc Superconductors*”, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, in press.
- [40]. T. Kashiwagi, K. Deguchi, M. Tsujimoto, K. Deifanazari, N. Orita, T. Koike, R. Nakayama, T. Kitamura, S. Hagino, H. Minami, T. Yamamoto, K. Kadowaki, K. Yamaki and R. A. Richard, “Frequency Tunability of the high temperature superconductor Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+δ</sub> oscillator in sub-terahertz and terahertz regions ”, accepted.

#### (4-4) 知財出願

- ① 平成22年度特許出願件数(国内 0 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 4 件、海外 4 件)