

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K20897

研究課題名(和文)高温超伝導体テラヘルツ波発振器の高出力化

研究課題名(英文)Development of high power terahertz emitters by using high-Tc superconductors

研究代表者

柏木 隆成 (KASHIWAGI, Takanari)

筑波大学・数理物質系・講師

研究者番号：40381644

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高温超伝導体Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+d}(Bi2212)単結晶を用いたテラヘルツ波発振器の高出力化を目指し、発振素子を構成するBi2212単結晶の厚さと発振出力の関係を調べた。その結果、結晶の厚さが5 μm程度までは、結晶が厚い素子ほど強い出力を示す傾向が得られた。これは、素子に含まれるジョセフソン接合の総数と、素子構造で決まる放射効率を用いて説明できると考えている。また、ジュール熱を効率よく逃がす素子構造の改善などを進めた。これらにより、発振素子形状を調整する事で、従来構造より2-3倍広い周波数帯域の0.3~2.4 THz程度の発振が得られるようになった。

研究成果の概要(英文)： We have developed terahertz (THz) emitters by using single crystals of high temperature superconductor Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+d} (Bi2212). In order to understand the radiation output power from Bi2212-THz emitters, we studied relationship between the thickness of Bi2212 crystals used for the emitters and the radiation output power. As a result, the radiation output power tends to increase with increasing the thickness of Bi2212 single crystals up to 5 μm. This behavior seems to be understood by considering the number of Josephson junctions in the mesa structures of Bi2212 single crystals and the radiation efficiency determined by the shape and size of the mesa structures. We also improved the device structure of Bi2212-THz emitters in order to remove Joule heating generated in the device. By the reduction of Joule heating on the devices, the radiation frequencies ranging from 0.3 to 2.4 THz can be obtained by adjusting the shape and size of the mesa structures.

研究分野：超伝導デバイス、物性実験

キーワード：テラヘルツ波 高温超伝導体 ジョセフソン接合

1. 研究開始当初の背景

新たな学術・産業分野を切り開く次世代技術として、安価で簡便・小型なテラヘルツ波発振器や検出器、及びその周辺機器の開発が注目されている。しかし、その開発はまだ途上で多方面からの技術開発が必要である。(ex. Tonouchi, *Nature. Photonics* **1** (2007) 97.)

我々は、2007年に高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi2212) 単結晶が内包する結晶構造に由来した多重ジョセフソン接合を用いて、世界に先駆けて高温超伝導体を用いたテラヘルツ波発振 (Bi2212-THz 発振器) を実現した (Ozyuser *et al.* *Science* **318** (2007) 1291)。その後、国内外の多くの研究機関で同様な研究が精力的に進められている (ex. Welp *et al.* *Nature Photon.* **7** (2013) 702)。

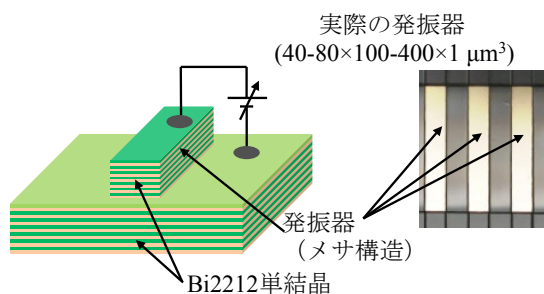


図-1 従来型メサ構造の概略図と加工した素子の写真。

図-1 に Bi2212-THz 発振器の概略図と加工した素子の写真を示した。この Bi2212-THz 発振器は、微細加工技術を用いて、 Bi2212 結晶を厚さ $1 \mu\text{m}$ 程度の箱型 (メサ構造) に成型したものである。厚さ $1 \mu\text{m}$ の結晶中には、原子レベルで制御された均一なジョセフソン接合が約 660 枚積層しており、ここに直流電圧を印加することで、交流ジョセフソン効果による高周波電流が発生する。また、箱型構造が共振器の役割を担い、発生した高周波電流を同期させることで強い電磁波放出が起こる。

半導体小型テラヘルツ波発振器との比較から、 Bi2212-THz 発振器の実用化のためには、1 THz 前後で 1 mW 程度の出力を実現することが一つの目安ではないかと考えている。発振周波数の制御は、素子の形状やサイズを調整することで可能である。一方、1つの発振素子から得られる発振強度は最大で $30 \mu\text{W}$ 程度 (Sekimoto *et al.*, *APL*, **103** (2013) 182601) である。原理的には発振器内部に含まれるジョセフソン接合の総数 N を増やすことで発振強度は制御できそうであるが、発振強度に関しては素子による個体差の影響が大きく、その制御には至っていない。

2. 研究の目的

素子特性の個体差の一因に、動作時に発生するジュール熱の影響があることが、当時の研究成果として徐々に明らかになってきた

(ex. Minami *et al.*, *PRB*, **89** (2014) 054503)。

そのため、申請者はこの発熱を緩和する新規高排熱発振器構造の開発を進めた。その結果、個体差がある程度減り、数十マイクロワット程度の出力が再現良く得られることが分かった。そこで、本研究では我々が開発を進める Bi2212-THz 発振器のさらなる理解と性能の向上を目指し、この高排熱発振器構造を用いて、(1) Bi2212-THz 発振器の発振出力の到達限界を見極めること、そして(2)発振器構造を再設計することでサブミリワットレベルの発振出力を実現することを目指した。

3. 研究の方法

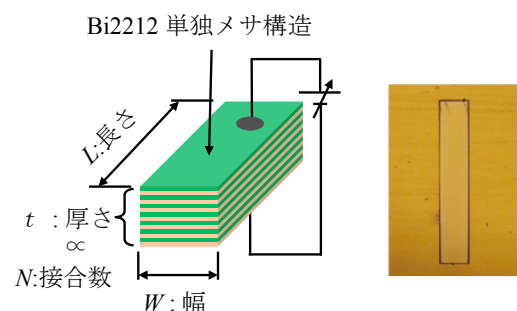


図-2 単独メサ構造の概略図と加工した素子の写真。

本研究では、図-2 に示す単独メサ構造を用いる。これは、図-1 に示したメサ構造下部の超伝導基板を除いた素子構造である。 Bi2212 単結晶の熱伝導率は、通常の金属などに比べて2桁程度悪い。そのため、この下部基板を取り除き、メサ構造を熱伝導率の良い基板に直接固定することで高い排熱効果が得られる。この単独メサ素子構造と、それを支持し、かつ高排熱効果が期待できる構造を用いて以下の点を中心に調べる。

(1) 発振出力の到達限界の見極め

単独メサ構造の厚さ t が異なる (含まれるジョセフソン接合数 N の異なる) 発振素子を複数作製し、「接合総数 N 、発振出力 P 、発振線幅 Δf 」等を評価の指標に、高排熱発振器構造を用いて出力の到達限界を見極める。

(2) 発振器構造の再設計と高出力化

高排熱発振器構造に関しては、使用する基板の材質やサイズ、集光用の Si-レンズのサイズや発振素子との距離の改善など、まだ検討の余地がある。よって、(1)を進めながら条件の最適化を行い、放射効率の改善や更なる冷却効率の向上などの発振機構の改善により、素子の高性能化を目指す。

4. 研究成果

背景・目的で述べたように、ここ最近の発振素子に関する研究から、素子の動作時の印

加電流・電圧によるジュール熱が、発振特性に大きく影響することが分かった。よって素子の自己発熱を抑え、素子によらず一定の排熱環境を実現することが、素子特性の向上と共に、個体差を抑え素子特性を評価するために重要である。

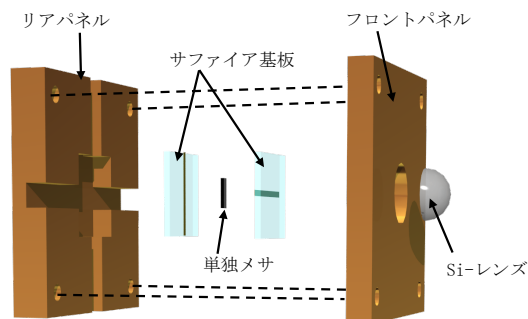


図-3 高排熱構造発振器の概略図。

本研究で用いた単独メサ構造素子から効率的に熱を逃がすための構造の概略図を図-3に示す。

単独メサ構造は、Bi2212 単結晶を数マイクロメートル程度に薄く劈開し、その両面を金属(銀, 金)で蒸着した後、アルゴンイオンミリングで箱型に整形することで製作した。この単独メサ構造の製作方法の確立も本研究の重要な成果の一つである。この単独メサ構造の作製方法、高排熱構造の詳細、及びこの高排熱構造を用いた発振器の発振特性は、[T. Kashiwagi *et al.*, *Physical Review Applied*, **4** (2015) 054018-1-16] にて、本研究成果として報告した。

図-3に示したように単独メサ構造は、2枚のサファイア基板で挟み込んだ。サファイア基板は低温(30-100 K程度において)で高い熱伝導率を示すため、これに直接固定することで単独メサ構造から効率的に熱を逃がすことができる。また2枚のサファイア基板には、金属を薄く(数十 nm程度)蒸着しておき、これを、単独メサ構造の上下の電極とした。

フロントパネル、及びリアパネルは、銅もしくは黄銅で製作した。また図-3に示したように、フロントパネル中央には穴が開いており、単独メサ構造上部のサファイア基板の真上に Si 半球レンズを置くことができる。Si 半球レンズにより、メサ構造からのテラヘルツ波を集光した。

全体のサイズは、 $20 \times 20 \times 5-10 \text{ mm}^3$ 程度になる。このような構造にすることで、排熱性の向上だけでなく、電極の安定化や素子のハンドリングが容易になるといった利点もある。この組み上げた発振器を、液体ヘリウムフロー型のクライオスタットのコールドステージに固定し、素子を冷却してその発振特性を評価した。

本研究では、単独メサ構造のサイズや形状を変え、その発振特性の詳細を調べるととも

に、上記の高排熱構造発振器の構造の見直しを適宜進めた。

参考までに、本研究で作製した発振器の例を図-4に示す。正方形のものが図-3に示した発振器である。正方形だけでなく円形の高排熱構造発振器も作製した。円形の発振器については、のちに説明する。



図-4 実際に作製・評価した発振器の例。

(1)発振出力の到達限界の見極め

本研究では、厚さの異なる長方形単独メサ構造を用いて、発振特性に関するデータを収集した。現状では、出力の到達限界について断定的なことを言うには至っていないが、ある程度の傾向については情報を得ることができた。

厚さが異なる3つの長方形単独メサ構造からの発振特性を比較した。比較した3つの素子サイズは、Sample1: $80 \times 400 \times 2 \mu\text{m}^3$, Sample2: $80 \times 400 \times 3.5 \mu\text{m}^3$, Sample3: $70 \times 350 \times 4.7 \mu\text{m}^3$ 程度である。素子に含まれるジョセフソン接合の接合総数は、それぞれ約1300枚, 2300枚, 3100枚に相当する。

電流-電圧特性 (I-V 特性)の温度依存性の基本的な振る舞いは、どの素子でも似た傾向が得られた。それらの I-V 特性は、低温ほど大きなヒステリシスを示し、温度の上昇に伴い、そのヒステリシスが小さくなる。また、最大印加電圧も素子の厚さによらず、5~6 V程度であった。この到達電圧は、従来構造に比べて2~3倍程度大きく、後に説明するように、これまでより高い周波数での発振が可能になった。また、原理的には、素子の厚さが増えるほど抵抗が高くなり、発振素子の最大印加電圧が大きくなる。一方で、素子温度が高温になるほど、抵抗値が小さくなる。よって、得られた5~6 Vの電圧は、素子の発熱とシステムの冷却能力のバランスを示しており、開発した素子構造の冷却能力が反映されている。この到達電圧の上昇、及びその到達値は、素子性能・設計において非常に重要であり、これに関する情報が得られた点は、本研究の大きな成果の一つである。

一方で、I-V 特性のヒステリシス曲線の全体形状については、素子によって少しずつ異なっていた。この理由は、単独メサ構造の作製

に用いた Bi2212 単結晶の特性の違いなどが反映されていると考えている。結晶の物性値が発振特性に及ぼす影響については、今後の重要な課題の一つである。

次に、素子から発振した電磁波の出力をボロメーターで評価した。但し、ボロメーターでは、発振周波数に関する情報は得られない。ボロメーターの最大出力電圧は、Sample1 : 30 mV, Sample2 : 220 mV, Sample3 : 800 mV 程度であった。最も強い出力を示す Sample3 の出力は、概算で数十 μW 程度になる。同じようなサイズの素子も別に測定したが、同様な傾向が得られた。そのため、現状では単独メサ構造の厚さが 5 μm 程度までであれば、厚い素子ほど強い出力が得られる傾向にあることが分かった。

次に、発振特性の詳細を調べるために、分光器を用いて、発振周波数のスペクトル強度を調べた。どの素子も、低温ほど高い発振周波数を示し、高温になるにつれ周波数が下がり、0.3~1.3 THz 程度の範囲に渡る発振周波数が素子温度を調整することで確認できた。これは I-V 特性の温度依存性に関係しており、交流ジョセフソン効果に従うと印加電圧が大きいほど高い交流電流が発生する。よって、到達電圧が大きくなった分、従来構造より 2~3 倍程度高い発振周波数が得られるようになった。

また、幾つかの特徴的な周波数で出力の増大を確認した。これらは、メサ構造に由来する空洞共振モードの TM(transverse magnetic) モードで説明できる。これまでの研究成果によると、メサ構造の幅を半波長とする電場の定在波モード TM(1,0)モードと、ジョセフソン効果による高周波電流の周波数が一致する時に強い発振が観測される傾向がある。Sample1, 2 は幅 80 μm , Sample3 は幅 70 μm より、それぞれの TM(1,0)モードの周波数は、450 GHz と 510 GHz になる。Sample2, 3 ではそれぞれの TM(1,0)モード付近でスペクトル強度が大きく増大することが確認できた。Sample1 では、期待される周波数より高い周波数で最大強度が得られた。これも I-V 特性の温度依存性に関係していると考えている。

この素子では接合数 N と発振出力 P の間に、「 $P \propto N^2$ 」の関係が期待できる。そこで、観測した発振周波数、その時の素子への印加電圧、及び交流ジョセフソン効果の関係をを用いて、発振時に動作している接合の総数を見積もった。そして、接合総数と発振スペクトル強度の関係を調べた。

その結果、観測された同じような発振周波数帯のスペクトル強度を比べてみると、冪乗則を示す振る舞いが見られた。ただし、その係数を決めるには至っていない。これは、これまでの発振素子では個体差が大きく、複数の素子にわたってこのような解析が困難で

あったこと考えると、今回得られた結果は大きな進展ではないかと考えている。

また、素子の厚さから見積もると、接合総数は、Sample1 が一番少なく、Sample3 が一番多い。その傾向を反映し、素子全体に含まれる接合総数が多い Sample3 で、一番強いスペクトル強度が得られた。これは、ボロメーターの結果とも一致する。ただ、Sample2 と Sample3 を比べてみると、どちらも同じような $N(\sim 2000)$ の付近で最大のスペクトル強度を示すが、その強度は Sample3 の方が一桁程度大きい。この結果は、メサ構造に由来するアンテナ構造の放射効率特性を考える事で、ある程度その振る舞いが理解できると考えているが、その詳細はもう少し検討が必要である。

以上より、本研究を通じて、素子の厚さを変えた場合の発振出力の傾向について、新たな知見が得られた。これにより、今後、素子の高出力化などの高性能化を進めるに当たり取り組むべき具体的な課題が、これまで以上に明確になった。

(2)発振器構造の再設計と高出力化

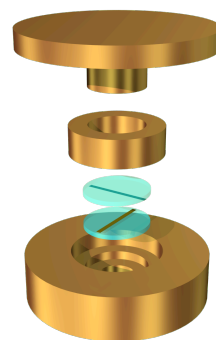


図-5 改良した高排熱構造の概略図。

本研究を開始してからしばらくは、図-3 の発振器構造を用いた。しかし、色々な素子で測定を進めていくと、この構造では、単独メサ構造をサファイア基板で挟み込む際、メサ構造を均一に固定できない場合があることがわかった。そこで、より均一に素子を挟み込むことが可能な素子構造を開発した(図-5)。具体的には、挟み込む時に力がメサ構造に均一に作用するように、同軸状の構造とした。これにより、高い排熱性を維持したまま、簡便かつ安定に素子の電氣的接触を取ることが可能になった。そのため、研究の後半ではこちらの構造を中心に素子の開発を進めた。

また、排熱性の向上を目指して、サファイア基板の代わりに人工ダイヤモンド基板を用いても同様な実験を行った。その品質、及び温度域にもよるが、人工ダイヤモンドを利用することで、一桁程度高い熱伝導が期待できる。ただ、現時点までの結果では、サファイア基板を用いたものと大きな差は得られ

ていない。放熱特性の改善は、重要な課題であり、適宜、単独メサ構造を支持する基板の選定を今後も進める予定である。

コンピューターシミュレーションより、高排熱構造で用いたサファイア基板によるサンドイッチ構造に関して、共振特性などについても検証した。特に外部構造が発振特性に及ぼす影響については、現状では得られていない。しかし、外部構造を効果的に利用できれば、素子特性のさらなる改善が期待できる。よって、今後も引き続きシミュレーションによる外部構造の最適化などを検証する。

また、今回の研究期間では、基板の厚さやその上の蒸着膜の条件、レンズの位置などに関する調整には至らなかったため、今後も引き続きこれらの検証を行う。

(3)発振周波数領域の拡大

高排熱発振器構造を用いることで、上記の2つ以外にも、発振周波数領域の拡大の点において大きな進展を得ることができた。具体的には、(1)で調べた長方形より面積が小さく、形状の対称性が高い円盤や正方形型の単独メサ構造について、高排熱構造を用いてその発振特性を詳細に調べた。

その結果、一辺 $80\mu\text{m}$ の正方形型メサ構造では、 $0.4\text{--}1.9\text{ THz}$ 、また、直径 $80\mu\text{m}$ の円盤型メサ構造では $0.5\text{--}2.4\text{ THz}$ と幅広い発振周波数を得ることに成功した。メサ構造下部に超伝導基板が残る従来構造でも、同様なサイズの素子に関する実験結果はあるが、1テラヘルツを超える発振は確認されていなかった。この理由は、従来メサ構造下部に残っていた熱伝導率の悪い超伝導基板を排除した単独メサ構造とその周辺を支える高排熱構造による排熱特性の改善により、素子に印加できる電圧が数倍増加したことが大きい。特に、円盤では2テラヘルツを超える発振が確認できており、これにより、現状では素子形状を適宜調整することで、 $0.3\text{--}2.4\text{ THz}$ 程度の周波数範囲をカバーできるようになった。これは、従来構造に比べ周波数領域が2~3倍拡大したことに相当する。これらの結果の詳細は、円盤に関しては [T.Kashiwagi *et al.*, *Applied Physics Letters* **107**, 082601 (2015)]にて報告した。また、長方形、正方形、円盤の発振特性の比較に関しては、 [T.Kashiwagi *et al.*, *Superconductor Science and Technology*, **30**, 074008 (2017)]にて報告を行った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6件)

- ① T. Kashiwagi, H. Kubo, K. Sakamoto, T. Yuasa, Y. Tanabe, C. Watanabe, T. Tanaka, Y. Komori, R. Ota, G. Kuwano, K.

Nakamura, T. Katsuragawa, M. Tsujimoto, T. Yamamoto, R. Yoshizaki, H. Minami, K. Kadowaki, R.A. Klemm, The present status of high- T_c superconducting terahertz emitters, *Superconductor Science and Technology*, 査読有, 30 巻, 2017, 074008

- ② C. Watanabe, H. Minami, T. Kitamura, Y. Saiwai, Y. Shibano, T. Katsuragawa, H. Kubo, K. Sakamoto, T. Kashiwagi, R. A. Klemm, K. Kadowaki, Electrical potential distribution in terahertz-emitting rectangular mesa devices of high- T_c superconducting $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$, *Superconductor Science and Technology*, 査読有, 29 巻, 2016, 65022

- ③ K. Nakade, T. Kashiwagi, Y. Saiwai, H. Minami, T. Yamamoto, R.A. Klemm, K. Kadowaki, Applications using high- T_c superconducting terahertz emitters, *Scientific Reports*, 査読有, 6 巻, 2016, 23178-1-8, DOI: 10.1038/ srep23178

- ④ M. Tsujimoto, I. Takeya, T. Kashiwagi, H. Minami, K. Kadowaki, Cavity mode identification for coherent terahertz emission from high- T_c superconductors, *Optics Express*, 査読有, 24 巻, 2016, 4591-4599, DOI: 10.1364/ OE.24.004591

- ⑤ T. Kashiwagi, T. Yamamoto, H. Minami, M. Tsujimoto, R. Yoshizaki, K. Delfanzari, T. Kitamura, C. Watanabe, K. Nakade, T. Yasui, K. Asanuma, Y. Saiwai, Y. Shibano, T. Enomoto, H. Kubo, K. Sakamoto, T. Katsuragawa, B. Markovic, J. Mirkovic, R.A. Klemm, K. Kadowaki, Efficient Fabrication of Intrinsic-Josephson-Junction Terahertz Oscillators with Greatly Reduced Self-Heating Effects, *Physical Review Applied*, 査読有, 4 巻, 2015, 054018-1-16, DOI:10.1103/ PHysRevApplied.4.054018

- ⑥ T. Kashiwagi, K. Sakamoto, H. Kubo, Y. Shibano, T. Enomoto, T. Kitamura, K. Asanuma, T. Yasui, C. Watanabe, K. Nakade, Y. Saiwai, T. Katsuragawa, M. Tsujimoto, R. Yoshizaki, T. Yamamoto, H. Minami, R.A. Klemm, K. Kadowaki, A high- T_c intrinsic Josephson junction emitter tunable from 0.5 to 2.4 terahertz, *Applied Physics Letters*, 査読有, 107, 2015, 082601-1-5.

[学会発表] (計 31件)

- ① T. Kashiwagi, T. Yuasa, H. Kubo, K. Sakamoto, C. Watanabe, T. Katsuragawa, T. Tanaka, Y. Komori, Y. Tanabe, R. Ota, G. Kuwano, M. Tsujimoto, R. Yoshizaki,

T. Yamamoto, H. Minami, R. Klemm, K. Kadowaki, Study of radiation intensity characteristics from $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ high- T_c superconducting terahertz emitters, APS March meeting 2017, 2017/0313-17, New Orleans, Louisiana, USA

② 柏木隆成, 田中大河, 久保裕之, 湯浅拓実, 渡辺千春, 坂本和輝, 桂川拓也, 小守優貴, 太田隆晟, 桑野玄気, 田邊祐希, 中村健人, 辻本学, 山本卓, 吉崎亮造, 南英俊, 門脇和男, 高排熱構造を用いた固有ジョセフソン接合系 $\text{Bi}2212$ テラヘルツ発振素子の発振特性 V, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 大阪大学 豊中キャンパス(大阪府)

③ T. Kashiwagi, H. Kubo, K. Sakamoto, T. Yuasa, Y. Tanabe, C. Watanabe, T. Katsuragawa, T. Tanaka, Y. Komori, R. Ota, G. Kuwano, K. Nakamura, M. Tsujimoto, T. Yamamoto, R. Yoshizaki, H. Minami, K. Kadowaki, Development of High- T_c superconducting terahertz emitter, The 29th International Symposium on Superconductivity (ISS2016), 2016/1213-15, Tokyo International Forum.

④ T. Kashiwagi, T. Yuasa, C. Watanabe, H. Kubo, K. Sakamoto, T. Katsuragawa, T. Tanaka, Y. Komori, R. Ota, G. Kuwano, Y. Tanabe, K. Nakamura, M. Tsujimoto, T. Yamamoto, R. Yoshizaki, H. Minami, R. Klemm, K. Kadowaki, Radiation Characteristics of high- T_c Superconducting Terahertz Emitter by Using a High Heat-Exhausting Structure, The 10th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and Plasma Oscillations in High- T_c Superconductors (Plasma+2016), 2016/10/09-12, Nanjing, China.

⑤ 柏木隆成, 湯浅拓実, 渡辺千春, 久保裕之, 坂本和輝, 桂川拓也, 田中大河, 小守優貴, 太田隆晟, 桑野玄気, 田邊祐希, 中村健人, 辻本学, 山本卓, 吉崎亮造, 南英俊, 門脇和男, 高排熱構造を用いた固有ジョセフソン接合系 $\text{Bi}2212$ テラヘルツ発振素子の発振特性 IV, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学 角間キャンパス(石川県)

⑥ 柏木隆成, 北村健郎, 渡辺千春, 柴野雄紀, 幸良彦, 榎本拓真, 久保裕之, 坂本和輝, 桂川拓也, 湯浅拓実, 田中大河, 小守優貴, 辻本学, 山本卓, 吉崎亮造, 南英俊, 門脇和男, 高排熱構造を用いた固有ジョセ

フソン接合系 $\text{Bi}2212$ テラヘルツ発振素子の発振特性 III, 日本物理学会 第 71 回年次会, 東北学院大学(宮城県)

⑦ T. Kashiwagi, K. Sakamoto, H. Kubo, Y. Shibano, T. Enomoto, T. Kitamura, K. Asanuma, T. Yasui, C. Watanabe, K. Nakade, Y. Saiwai, T. Katsuragawa, T. Tanaka, T. Yuasa, M. Tsujimoto, R. Yoshizaki, T. Yamamoto, H. Minami, R. Klemm, K. Kadowaki, A high T_c superconducting terahertz emitter operated from 0.5 to 2.4 THz, APS March meeting 2016, 2016/0314-18, Baltimore, USA

他 24 件

[図書] (計 1 件)

① Manabu Tsujimoto, Takanari Kashiwagi, Hidetoshi Minami, Kazuo Kadowaki, Broadly Tunable CW Terahertz Sources Using Intrinsic Josephson Junction Stacks in High-Temperature Superconductors, InTech 出版社, Terahertz Spectroscopy-A Cutting Edge Technology, Chapter10 p.191-207, 2017, DOI:10.5772/67087

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: テラヘルツ帯域電磁波発振素子およびテラヘルツ帯電磁波発振装置
発明者: 柏木隆成, 門脇和男, 南英俊, R. A. Klemm
権利者: 国立大学法人筑波大学
種類:
番号: 特願 2015-122057
出願年月日: 2015/06/17
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

http://www.ims.tsukuba.ac.jp/~Kadowaki_lab/index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柏木隆成 (KASHIWAGI, Takanari)
筑波大学・数理物質系・講師
研究者番号: 40381644

(2) 研究協力者

門脇 和男 (KADOWAKI, Kazuo)
南 英俊 (MINAMI, Hidetoshi)
辻本 学 (TSUJIMOTO, Manabu)