

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K04688

研究課題名(和文) 高温超伝導体によるテラヘルツ波発振の高周波数化、高強度化と高温化

研究課題名(英文) Improvement of the frequency, intensity and temperature performance of the terahertz emission from high-Tc superconductor

研究代表者

南 英俊 (MINAMI, Hidetoshi)

筑波大学・数理物質系・講師

研究者番号：00190702

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：高温超伝導体Bi₂Sr₂CaCu₂O₈₊によるテラヘルツ波発振器の発振の高強度化、高周波数化、動作温度の高温化を目指して、発振素子の1×4～2×7のレイの作製技術、効率的な排熱の技術の開発、素子構造の工夫を行った。その結果、本研究開始前の最高値(～30 μW)の2.7倍(～80 μW)の発振出力を観測することに成功した。その最高強度は72.5 Kで観測され、動作温度の高温化が同時に行えた。また、発振周波数は2.4 THzまで広げること成功した。

研究成果の概要(英文)：Terahertz electromagnetic wave emitter made with high-Tc superconductor Bi₂Sr₂CaCu₂O₈₊ was studied, with the aim of increasing the radiation output, widening the radiation frequency, and raising the operation temperature. We worked on the development of techniques which fabricate the device arrays of 1×4～2×7 and efficiently remove the heat generated in the devices, and the improvement of the device structure, and so on. As a result, we succeeded in making the radiation output 2.7 times compared with the highest before this project (from ~30 μW to ~80 μW). The highest intensity was observed at the temperature of 72.5 K, implying the improvement of the operation temperature performance. The highest radiation frequency was successfully expanded to 2.4 THz.

研究分野：固体物理

キーワード：テラヘルツ ジョセフソン効果 高温超伝導

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ帯と呼ばれる 0.3 ~ 10 THz の電磁波領域は、エレクトロニクスとフォトニクス技術の狭間にあるため、高強度な単色光を発生する使い勝手の良い小型光源を得ることが難しい(テラヘルツギャップ)。量子カスケードレーザーや共鳴トンネルダイオードなど半導体デバイスがその溝を埋めつつあるが、現状では発生強度などまだ課題が多く精力的に研究開発が行われている。

超伝導ジョセフソン接合(超伝導体/極薄の絶縁体/超伝導体のサンドイッチ構造)に DC バイアスを印加すると、交流ジョセフソン電流が励起され単色の連続テラヘルツ波が得られることが知られている。単一のジョセフソン接合が放射するテラヘルツ波は微弱 (<1nW) であるが、交流ジョセフソン電流が位相同期するよう複数のジョセフソン接合を協調動作させることができれば、発生強度は接合数の 2 乗で増加する。そのため、従来の金属超伝導体では、単一接合素子を薄膜技術によって大規模に 2 次元アレイ化することによって高強度化に成功している。

高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi2212) はジョセフソン接合が原子レベルで天然に積層 (670 層/1 μm) した構造 (固有ジョセフソン接合系) をしており、2007 年、メサ形状に加工した単結晶から、容易に検出できるレベルの強度 (~ μW) をもつテラヘルツ波を取り出すことに成功している。その高い超伝導転移温度 ~90 K と大きな超伝導エネルギーギャップ ~60 mV によって、従来の金属超伝導体では不可能な ~80 K での動作と 1 THz を超える周波数での発生が可能となる。そのため、冷却装置を大幅に小型化・簡素化することができ、また、テラヘルツ帯域の中でも特に溝が深い 1 ~ 2 THz 域を埋めることが狙える。

発生強度を上げるには協調動作する接合数を増やせばよいが、素子の自己発熱による温度上昇が発生現象を阻害するという問題があった。また、素子の温度上昇は発生周波数を抑えてしまう上、過剰な冷却が必要となり動作温度を抑えていた。そこで、我々は素子で発生するジュール熱を効率的に排熱する技術の開発に取り組んだ(2014 年特許出願 特願 2014-177877)。その結果、2014 年に 0.43 THz 付近の周波数において液体窒素冷却で発生強度を最適化することに成功し、また、従来 1 THz 付近であった発生周波数の上限を 1.65 THz まで広げることになった。発生強度に関しても、技術は異なるが排熱性の向上によって、2013 年にそれまでの数倍にあたる 30 μW @0.44 THz を実現した。

しかしながら、発生出力はまだ不十分であり、その高強度化が最大の課題である。また、使い勝手の良い小型光源とするには動作温度の高温化を両立させる必要がある。さらに、テラヘルツ帯域の中でも特に溝が深い 1 ~ 2 THz 域への発生周波数の拡張と高強度化が必要である。

2. 研究の目的

高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ によるテラヘルツ波発生器の発生の高強度化、高周波数化と動作温度の高温化を目的とする。また、使い勝手の良い小型光源を目指し、それらを同時に向上させる技術を開発する。

3. 研究の方法

空洞共振周波数を揃えた積層ジョセフソン接合系を形成するために、Bi2212 単結晶をメサ状構造 (幅 50 ~ 100 μm 長さ 200 ~ 400 μm 高さ 2 ~ 5 μm の矩形や直径 ~ 80 μm の円盤型) に加工にする。メサ状構造部が載る基盤部は Bi2212 単結晶とは限らず、サファイア基板に真空蒸着した金属薄膜を基盤部とする構造 (スタンドアロンメサ構造と呼ぶことにする) も作製した (図 1)。

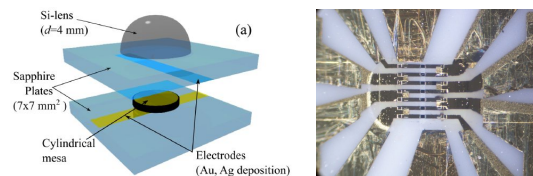


図 1

図 2

発生強度を上げるため、ジョセフソン接合数を増やすことに取り組んだ。メサ構造内の接合数を増やすためにメサ部を厚く加工する技術の開発を進めた。メサ部を厚くするために我々が始めた金属マスクによるアルゴンイオンミリングに加えて、さらにフォトリソグラフィとウェットエッチングによる作製技術の開発を進めた。また、メサ構造部を 1x4 ~ 2x7 にアレイ化する技術、配線技術の開発を進めた (図 2)。

発生強度、発生線幅や放射分布に関する過去の研究結果から、メサ構造部内のジョセフソン接合で発生する交流ジョセフソン電流間の位相同期現象が十分発達おらず、また、現在の構造は電磁波放射に適した構造にはなっていないと推測した。そこで、さらに多くなったジョセフソン接合の間の協調動作を促進する方法、放射効率を上げる方法の研究と構造の開発を進めた。開発してきたウェットエッチング技術によって、メサ構造部の外部に構造体を作り込む新しい試みを始めた。また、アレイ内の素子間の協調動作を促進する構造についても研究を進めた。

メサ構造部で発生するジュール熱による温度上昇を抑えることが、接合数の増加による発生の高強度化、高周波数化、動作温度の高温化を実現する上で不可欠である。2014 年に特許出願したメサ構造部の上面からも徐熱する素子構造を、いろいろな構造を持つメサ素子に合わせて設計し作製した (図 1, 3, 4)。従来のデバイス構造 (Bi2212 単結晶の基盤を持つメサ構造) から熱伝導の悪い超伝導体基盤部を取り除いたスタンドアロンメサ構造部を、熱伝導の良いサファイア基板

で上下から挟んだ素子（図1）も作製した。

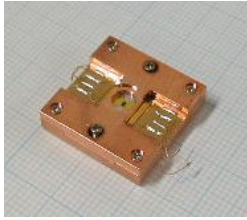


図3

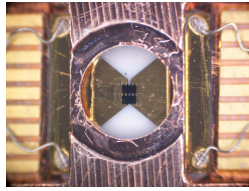


図4（拡大図）

徐熱構造を備えたメサ素子ホルダー（図3，4）メサ素子をバイアスするためのリードフレーム（図2，4）メサ素子のアレイを作製するためのアルゴンイオンミリング用メタルマスクや、電流リード蒸着用のメタルマスクなどの作製には、初年度に本研究費で購入した高精度小型切削機（NCフライス）を用いた。

素子の冷却には液体ヘリウム循環型クライオスタット、テラヘルツ波の検出とパワーの見積もりには Si コンポジットボロメータ（プリアンプゲイン×200）InSb ホットエレクトロンボロメータ（プリアンプゲイン×1000）、サブミリ波パワーメータ（PM4, VDI-Erickson）、発振スペクトルの測定にはフーリエ変換マイケルソン干渉計（マーティンパレット型）を用い、Si コンポジットボロメータまたは TGS 焦電センサーで検出した。

4. 研究成果

(1) 発振素子のアレイ化

メサ型発振素子の 1×4 から 2×7 までのアレイを作製した。図2の素子では、幅 $80 \mu\text{m}$ 長さ $1000 \mu\text{m}$ の Bi2212 基盤上に、幅 $80 \mu\text{m}$ 長さ $350 \mu\text{m}$ の矩形メサ状構造が2つ載った素子を、 $80 \mu\text{m}$ 間隔で7つ平行に配列している。全14のメサ型素子は直列に接続されている。外部へ接続する端子が多くなるため半田付けができる様メタライズドアルミナ基板を採用し、メサ型素子間の電磁氣的結合を促進するために直上にグランドプレーンを配置した。このタイプの素子に多くの時間と労力を注いだが、発振強度を上げることはできなかった。

図3、図4の素子では、サファイア基板に貼った Bi2212 単結晶上に、幅 $80 \mu\text{m}$ 長さ $350 \mu\text{m}$ の矩形メサ状素子を 2×4 個作製し、 $100 \mu\text{m}$ のギャップを開けた2枚の電極に押し付けることで電流リードとした。したがって、図5の挿入図に等価回路を示すが、4つが並列に接続された2組のメサ状素子群が直列に接続されている。この素子によって、本研究開始前の最高値（ $\sim 30 \mu\text{W}$ ）の1.2倍の発振出力を観測することに成功した。図5に電流電圧特性、InSb ホットエレクトロンボロメータ(HEB)とパワーメータの応答を示す。HEB出力の最大値 390 mV は $0.33 \mu\text{W}$ に対応し、立体角 0.02 sr で観測した。パワーメータは立体角 0.12 sr で観測した。

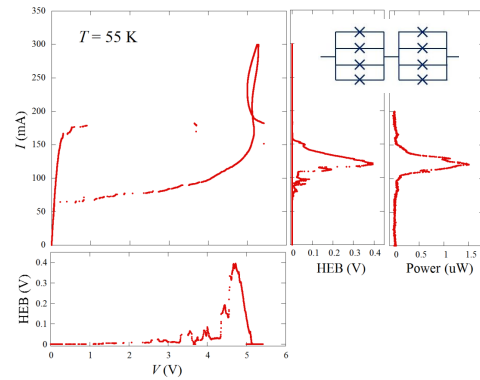


図5

図6は検出器としてTGS焦電センサーを用いて測定した発振スペクトルである。バイアス電流を変えることにより発振線のピーク・肩の数が2~6で変化するが、アレイ内素子の協調動作の実証となる発振周波数の引き込み現象を明確には確認できていない。

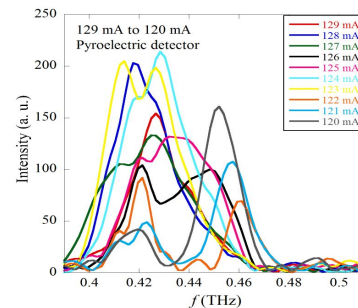


図6

(2) 高強度化と動作温度の高温化

メサ部と基盤部の間にインピーダンス不整合を導入しコントロールすることでジョセフソン接合間の協調動作を促進させる着想を得、メサ部の外部に構造体を作り込む新しい試みを始めた。同時にテラヘルツ波の放射効率を上げる構造を検討し、矩形メサ部の周りの基盤部を打ち抜いて作製したスロットをメサ部に隣接させた素子を作製した。スロットの作製には開発してきたウェットエッチング技術を用いた。図7の素子は、幅 $80 \mu\text{m}$ 長さ $350 \mu\text{m}$ の矩形メサ状素子4個からなり、電流リードは図3、図4と同じ構成とした。等価回路を図7に示す。

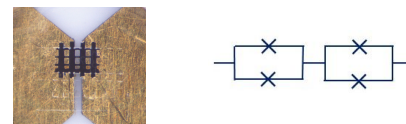


図7

この素子は、本研究開始前の最高値（ $\sim 30 \mu\text{W}$ ）の2.7倍（ $\sim 80 \mu\text{W}$ ）の発振出力を示した。また、その最高強度は 72.5 K で観測され、動作温度の高温化が同時に行えた。図8に電流電圧特性と、立体角 0.02 sr で観測した

InSb ホットエレクトロノボロメータ(HEB)の応答を示す。HEB 出力の最大値 910 mV は 0.78 μ W に対応する。

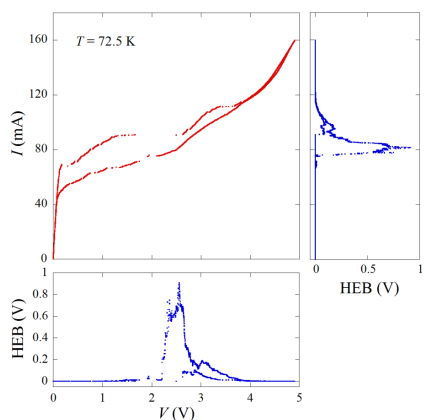


図 8

図 9 は、検出器として TGS 焦電センサーを用いて測定した発振スペクトルである。室温動作のセンサーと 4 回の平均化で、このレベルの信号が取得できるところまで達成できた。

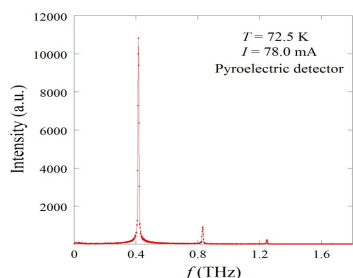


図 9

本研究によって、素子構造を工夫することで高強度化できることが示された。さらなる高強度化がこのアプローチによって可能であると考えられる。

(3) 高周波数化

図 1 のように、円盤型の単結晶を熱伝導の良いサファイア基板で挟むことによって、素子の温度上昇によるジョセフソン電圧の低下を抑え、微弱ではあるがこれまでで最高の 2.4 THz までのテラヘルツ波を観測することに成功した(論文 10)。図 10 は、検出器として Si コンポジットボロメータを用いて測定した発振スペクトルである。

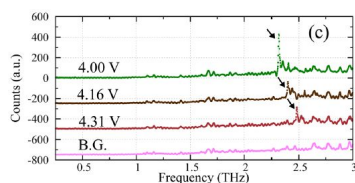


図 10

低周波数側にピークがないことから、2.4 THz

の発振は低次モード発振の高調波ではなく高次の共振モードによる発振である。図 11 に温度を変えて測定した発振の周波数と強度を示す。一つの素子が、0.5 THz から 2.4 THz までの広い周波数範囲で連続単色電磁波を発振する。この性質を利用する分光応用に関して、2018 年、特許出願をした。

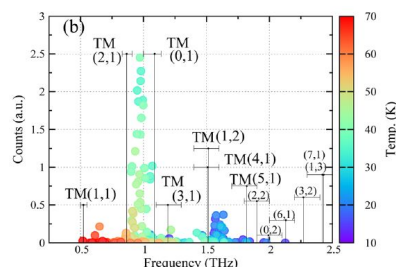


図 11

(4) その他

(1) ~ (3)の成果は、同時に進めた作製技術の開発に支えられている。2014 年に出願した特許(特願 2014-177877)に基づくメサ部で発生するジュール熱を効率的に排熱する技術(論文 8)と、ウェットエッチング技術の開発に負うところが大きい。

(5) 研究成果の発信について

研究期間前の 2014 年に出願した特許(特願 2014-177877)の特許取得に向けて、本研究期間中に審査請求を行い現在審査中である。2016 年発表の論文 5 は、研究期間前の 2014 年春にすでに学会発表し科研費成果報告書(萌芽)に記載したものであるが、本研究期間中に論文を公開した。研究成果(2)は研究期間最終盤に得られたため、今後さらに研究を進め報告する予定である。

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 10 件)

1. T. Kashiwagi, ..., H. Minami(12th), ..., K. Kadowaki(15th), Thermoreflectance microscopy measurements of the Joule heating characteristics of high- T_c superconducting terahertz emitters, J. Appl. Phys., 査読有, **122** (2017) 233902 (9pp), DOI: 10.1063/1.5002743. 15 人
2. T. Kashiwagi, ..., H. Minami(16th), K. Kadowaki(17th), ..., The present status of high- T_c superconducting terahertz emitters, Supercond. Sci. Technol., 査読有, **30** (2017) 074008 (10pp), DOI: 10.1088/1361-6668/aa6dd7. 18 人
3. D. P. Cerconey, ..., H. Minami(12th), K. Kadowaki(13th), ..., Cavity mode enhancement of terahertz emission from equilateral triangular microstrip antennas of the high- T_c superconductor $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$, J. Phys.: Condensed Matter, 査読有, **29**

- (2017) 015601 (15pp), DOI: 10.1088/0953-8984/29/1/015601. 14 人
4. C. Watanabe, H. Minami(2nd), ..., K. Kadowaki(11th), Electrical potential distribution in terahertz-emitting rectangular mesa devices of high- T_c superconducting $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$, *Supercond. Sci. Technol.*, 査読有, **29** (2016) 065022 (9pp), DOI: 10.1088/0953-2048/29/6/065022. 11 人
 5. H. Minami, C. Watanabe, T. Kashiwagi, T. Yamamoto, K. Kadowaki, R. A. Klemm, 0.43 THz emission from high- T_c superconducting emitters optimized at 77 K, *J. Phys.: Condensed Matter*, 査読有, **28** (2016) 025701 (7pp), DOI: 10.1088/0953-8984/28/2/025701. 6 人
 6. M. Tsujimoto, I. Kakeya, T. Kashiwagi, H. Minami, K. Kadowaki, Cavity mode identification for coherent terahertz emission from high- T_c superconductors, *Optics Express*, 査読有, **24** (2016) 4591-4599, DOI: 10.1364/OE.24.004591. 5 人
 7. 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** (2016) 23178 (8pp), DOI: 10.1038/srep23178. 7 人
 8. T. Kashiwagi, ..., H. Minami(3rd), ..., K. Kadowaki(21th), Efficient Fabrication of Intrinsic-Josephson-Junction Terahertz Oscillators with Greatly Reduced Self-Heating Effects, *Phys. Rev. Appl.*, 査読有, **4** (2015) 054018 (16pp), DOI: 10.1103/PhysRevApplied.4.054018. 21 人
 9. T. M. Benseman, ..., H. Minami(12th), ..., K. Kadowaki(14th), Current Filamentation in Large $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ Mesa Devices Observed via Luminescent and Scanning Laser Thermal Microscopy, *Phys. Rev. Appl.*, 査読有, **3** (2015) 044017 (7pp), DOI: 10.1103/PhysRevApplied.3.044017. 14 人
 10. T. Kashiwagi, ..., H. Minami(16th), ..., K. Kadowaki(18th), A high- T_c intrinsic Josephson junction emitter tunable from 0.5 to 2.4 terahertz, *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, **107** (2015) 082601 (5pp), DOI: 10.1063/1.4929715. 18 人

〔学会発表〕(計 40 件)

1. 柏木隆成, ..., 南英俊, 門脇和男, サーマリフレクタンス法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特性評価, 日本物理学会第 73 回年次大会 (2018 年), 2018-3-22~25, 東京理科大学野田キャンパス
2. 南英俊, ..., 門脇和男, 高温超伝導テラヘルツ波発振素子アレイの研究, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 2018-3-17~20, 早稲田大学西早稲田キャンパス

ンパス

3. Richard Klemm, ..., H. Minami, ..., K. Kadowaki, Terahertz emission from the intrinsic Josephson junctions of high-symmetry thermally-managed $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ microstrip antennas, American Physical Society March Meeting 2018, 2018-3-5~9, Los Angeles, USA.
4. T. Kashiwagi, ..., H. Minami, ..., K. Kadowaki, Study of Joule heating characteristics of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ high- T_c superconducting terahertz emitters, American Physical Society March Meeting 2018, 2018-3-5~9, Los Angeles, USA.
5. 柏木隆成, ..., 南英俊, 門脇和男, 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周波数特性について, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017-9-12~15, 岩手大学上田キャンパス
6. 田中大河, ..., 南英俊, 門脇和男, 高温超伝導体 $\text{Bi}2212$ THz 波発振素子の発熱評価と発振特性, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 2017-9-5~8, 福岡国際会議場
7. 湯浅拓実, ..., 南英俊, 門脇和男, 高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+}$ を用いた THz 波発振素子の発振強度に関する研究, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 2017-9-5~8, 福岡国際会議場
8. 田邊祐希, ..., 南英俊, 門脇和男, 高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+}$ を用いた円盤型テラヘルツ波発振素子のウェットエッチング法による作製と評価, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 2017-9-5~8, 福岡国際会議場
9. 小守優貴, 南 英俊, ... 門脇和男, 高温超伝導体を用いたテラヘルツ波発振素子のウェットエッチング法による作製, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 2017-9-5~8, 福岡国際会議場
10. T. Kashiwagi, ..., H. Minami, ..., K. Kadowaki, Device characteristics of high- T_c superconducting intrinsic Josephson junction terahertz emitters, 28th Int. Conf. Low Temp. Phys., 2017-8-9~16, Gothenburg, Sweden.
11. 柏木隆成, ..., 南英俊, 門脇和男, 高廃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, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017-3-17~20, 大阪大学豊中キャンパス
12. 田中大河, ..., 南英俊, 門脇和男, 高温超伝導体 $\text{Bi}2212$ THz 波発振素子の発熱評価に向けた研究開発, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017-3-14~17, パシフィコ横浜
13. 南英俊, ..., 門脇和男, 高温超伝導テラヘルツ波発振デバイスのアレイの作製, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017-3-14~17, パシフィコ横浜
14. T. Kashiwagi, ..., H. Minami, ..., K.

- Kadowaki, Study of radiation intensity characteristics from $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ high- T_c superconducting terahertz emitters, American Physical Society March Meeting 2017, 2017-3-13~17, New Orleans, Louisiana, USA.
15. 渡邊千春, 南 英俊, ...門脇和男, PL 発光を生じる半導体薄膜による高温超伝導体 THz 波発振デバイスの新規温度分布観測, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016-9-13~16, 金沢大学
 16. 柏木隆成, ... , 南英俊, 門脇和男, 高廃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, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016-9-13~16, 金沢大学
 17. 湯浅拓実, ... , 南英俊, 門脇和男, 高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+}$ を用いた THz 波発振素子における発振強度の厚さ依存性に関する研究, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016-9-13~16, 新潟市朱鷺メッセ
 18. 坂本和輝, ... , 南英俊, 門脇和男, 円盤型単独メサ構造を用いた $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+}$ 固有ジョセフソン接合による THz 波発振素子の開発, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016-9-13~16, 新潟市朱鷺メッセ
 19. 小守優貴, ... , 南英俊, ...門脇和男, 高温超伝導体を用いたテラヘルツ波発振素子のウェットエッチング法による作製, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016-9-13~16, 新潟市朱鷺メッセ
 20. 柏木隆成, ... , 南英俊, 門脇和男, 高廃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, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016-3-19~22, 東北学院大学
 21. 渡邊千春, 南 英俊, ...門脇和男, $\text{Bi}2212$ 高温超伝導体単独メサデバイスの温度分布測定, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016-3-19~22, 東北学院大学
 22. 久保裕之, ... , 南英俊, 門脇和男, 高温超伝導体単結晶 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+}$ を用いた正方形型単独メサ構造からの THz 波発振特性, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 2016-3-19~22, 東京工業大学
 23. 南英俊, ... , 門脇和男, Stand-alone 型 HTS-THz 波発振デバイスの作製と発振特性, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 2016-3-19~22, 東京工業大学
 24. C. Watanabe, H. Minami, T. Kitamura, T. Kashiwagi, R. A. Klemm, K. Kadowaki, The emission mechanism of THz electromagnetic waves from $\text{Bi}2212$ mesa device, American Physical Society March Meeting 2016, 2016-3-14~18, Baltimore, Maryland, USA.
 25. T. Kashiwagi, ... , H. Minami, ... , K. Kadowaki, A high T_c superconducting terahertz emitter operated from 0.5 to 2.4 THz, American Physical Society March Meeting 2016, 2016-3-14~18, Baltimore, Maryland, USA.
 26. 渡邊千春, 南 英俊, ...門脇和男, 高温超伝導体 THz 波発振デバイスに生じた電位分布が発振特性に与える影響, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015-9-16~19, 関西大学
 27. 柏木隆成, ... , 南英俊, 門脇和男, 高廃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, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015-9-16~19, 関西大学
 28. 北村健郎, ... , 南英俊, 門脇和男, 固有ジョセフソン接合系 $\text{Bi}2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 単独メサ構造によるテラヘルツ波発振のメサ形状効果, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015-9-16~19, 関西大学
 29. 柴野雄紀, ... , 南英俊, 門脇和男, 高温超伝導体 $\text{Bi}2212$ の新しい単独メサ構造作製法の開発, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 2015-9-13~16, 名古屋国際会議場
 30. 久保裕之, ... , 南英俊, 門脇和男, 高温超伝導体単結晶 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+}$ を用いた正方形型単独メサ構造からの THz 波発振特性, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 2015-9-13~16, 名古屋国際会議場
 31. 坂本和輝, ... , 南英俊, 門脇和男, 円盤型単独メサ構造を用いた $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+}$ 固有ジョセフソン接合による THz 波発振素子の開発, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 2015-9-13~16, 名古屋国際会議場
- 〔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の発振方法, テラヘルツ帯域電磁波発振素子の発振装置及び分光器
発明者: 柏木隆成, 南英俊, 門脇和男
権利者: 国立大学法人 筑波大学
種類: 特許
番号: 特願 2018-032280
出願年月日: 2018 年 2 月 26 日
国内外の別: 国内
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
南 英俊 (MINAMI, Hidetoshi)
筑波大学・数理物質系・講師
研究者番号: 00190702
- (2) 研究分担者
門脇 和男 (KADOWAKI, Kazuo)
筑波大学・数理物質系・教授
研究者番号: 00272170