研究論文

BSCCO サブテラヘルツ発振素子の電流電圧特性と放射特性

—液体ヘリウムによる直接冷却からみる自己発熱効果—

八巻 和宏^{*†}, 田村 晃一^{*}, 入江 晃亘^{*}*I-V* and Radiation Characteristics in BSCCO Sub-THz Oscillator
at Liquid He TemperatureKazuhiro YAMAKI^{*†}, Kouichi TAMURA^{*} and Akinobu IRIE^{*}

Synopsis: Terahertz emission from BSCCO single-crystal mesa structures has recently attracted considerable attention. Since power fed into the mesa is of the order of 10^6 W/cm², a significant self-heating effect appears in *I-V* characteristics. We measured *I-V* characteristics of a BSCCO sub-THz oscillator using three cooling methods. When the mesa is cooled directly by liquid helium, the maximum applied voltage is increased up to three times compared with that cooled using a helium flow cryostat. Moreover, radiation characteristics of the BSCCO sub-THz oscillator in liquid helium were investigated using a BSCCO mesa detector. The radiation, identified as TM (2, 0) mode (i.e., the second harmonics of cavity resonance mode along width), is successfully observed.

Keywords: intrinsic Josephson junctions, *I-V* characteristics, terahertz wave

(Some figures in this article may appear in colour only in the electronic version)

1. はじめに

高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ （以下、BSCCO）は結晶構造中に超伝導/絶縁体/超伝導からなるジョセフソン接合を内在しており、このような結晶構造内部にジョセフソン接合を含む系は固有ジョセフソン接合系とよばれている^{1,2)}。この固有ジョセフソン接合系の特徴として、電流-電圧特性において多重ブランチ構造を取ることが挙げられ、超伝導層が3オングストローム程度と原子層であることから、隣接する接合との間に電磁氣的結合が生じ、非線形の一次元格子として振る舞うことが知られている³⁾。固有ジョセフソン接合の発見は、良質な結晶において原子レベルで等価なジョセフソン接合を数百から数千個積層可能であることを意味しており、多積層ジョセフソン構造に起因する新奇エレクトロデバイスの開発が期待されている。

近年、この固有ジョセフソン接合を内在する BSCCO 単結晶試料をメサ状に加工し直流電圧を印加することでテラ

ヘルツ帯の電磁波放射が確認され注目を集めている⁴⁻¹⁹⁾。発振周波数が今後の通信分野への応用が期待されるテラヘルツ帯にあることに加え、単一ジョセフソン接合においてピコワット程度だった発振出力がマイクロワットまで上昇したことから、多数の固有ジョセフソン接合のコヒーレント動作が示唆され、同接合のテラヘルツ波発振素子としての応用が広く意識されるようになった。最近では、3つの発振素子（メサ構造）をコヒーレントに動作させることで、発振出力は 610 μW まで増大している⁹⁾。この電磁波発振素子は固有接合の接合数が 600 から 2000 程度、また素子の断面積も 12000 から 32000 μm^2 と従来研究されてきた固有接合素子に比べ大きく、顕著な自己発熱効果が生じることが知られている。そのため、自己発熱効果によって生じるホットスポットが発振特性に与える影響に関して盛んに研究が進められている¹²⁻¹⁷⁾。また、発振に最適な温度に関しても素子によるばらつきが見られるものの概ね 30~50 K で最大の発振出力が得られるという結果が報告されている¹⁷⁾。

我々のグループでは自己発熱効果の小さい、より接合数の少ない 500 接合以下の発振素子の放射特性評価を、BSCCO 微小メサ構造を利用した検出素子を用いて行っており^{18,19)}、接合数 170 までの発振素子で電磁波の放射を確

Received April 2, 2014

^{*} 宇都宮大学大学院工学研究科
〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2
Graduate School of Engineering, Utsunomiya University,
7-1-2 Yoto, Utsunomiya, Tochigi 321-8585, Japan

[†] E-mail: kyamaki@cc.utsunomiya-u.ac.jp
DOI: 10.2221/jcsj.49.373

認した。しかし、これまで我々が行ってきた発振検出測定は電磁波の入射による検出素子の臨界電流の減少を利用しているため、発振周波数の直接的な同定には至っておらず、マイクロ波帯の電磁波発振を検出しているのではないかという疑念もあった。そこで、本研究では、ボロメーターと分光器で既に特性を評価した発振素子を液体ヘリウムで直接冷却し、冷却法による電流-電圧特性の変化と発振特性を評価した。

2. 冷却法による電流-電圧特性の変化

2.1 冷却法

発振素子の冷却法を **Fig. 1** に示す。本研究では、3つの冷却法によって発振素子の電流-電圧特性がどのように変化するか評価した。なお、本研究で用いた BSCCO 発振素子は、サファイア基板にポリイミドを用いて固定された BSCCO 単結晶上に、フォトリソグラフィとアルゴンイオンミリングを用いて作製されている。**Fig. 1(a)** は発振素子をインサートに取り付け、液体ヘリウムに浸すことで直接冷却した際の概略図と発振素子の光学顕微鏡写真である。素子が液体ヘリウムに浸ると 4.2 K に冷却され、また、液面からの距離によって温度を制御できる。**Fig. 1(b)** にヘリウムフロー型クライオスタットによる冷却法の模式図を示す。トランスファーチューブによって運ばれたヘリウムガスが銅製サンプルホルダーを冷却し、ホルダーとサファイア基板との熱接触により、素子は間接的に冷却される。このとき、クライオスタット内部は真空となっており、発振素子の冷却はホルダーからの熱伝導のみによっているため、自己発熱効果が顕著な系においては、素子への最大印加電圧は強く抑制される。また、拡大図に示す通り、ホルダーにサファイア基板をワニスで固定するか、熱伝導の良い銀ペーストで固定するかによっても電流-電圧特性は大きく変化する。本稿では、直接冷却の場合を①デューワー、ヘリウムフロー型クライオスタットでの接着剤による冷却をそれぞれ、②ヘリウムフロー銀ペースト、③ヘリウムフロー GE ワニスと表記する。

2.2 単独メサの電流-電圧特性

3つの冷却法で測定した 20 K における発振素子の電流-電圧特性と電力-電圧特性を **Fig. 2** に示す。発振素子は $400 \times 80 \times 1.2 \mu\text{m}^3$ の BSCCO メサ試料である。臨界電流に関しては、どの冷却法においても 40 ~ 50 mA 程度、電圧状態から超伝導状態に移移するリトラッピング電流は 5 mA 程度と大きな差異は見られないが、電流-電圧特性上で素子に印加する最大電圧（以下、 V_{max} ）は、2.1 V 程度から 0.7 V 程度まで大きく変化している。また、 V_{max} における投入電力に関しても直接冷却時に大きくなるが、最大印加電圧ほどの顕著な変化は見られず、冷却法により冷却効率が異なることが伺える。

最大印加電圧はメサを空洞共振器と見なしたときに励起

Fig. 1 Three cooling methods. (a) Dewar, direct cooling by liquid helium and an optical microscope image of BSCCO IJJ oscillators and (b) indirect cooling using a helium flow cryostat. A couple of mesa structures on a sapphire substrate were attached to a Cu block (sample holder) with an Ag paste or GE varnish.

Fig. 2 $I_{\text{osc}}-V_{\text{osc}}$ and $P_{\text{input}}-V_{\text{osc}}$ characteristics at 20 K.

される共振モードとも関係があり、発振素子における重要なパラメータである。ワニスで基板を固定した場合の電流-電圧特性はリターンブランチの飛びが見られることから一概に比較はできないが、ヘリウムフロー型クライオスタットの場合、自己発熱効果によって、素子への電圧印加は強く抑制される。直接冷却時の素子の 4.2 K から 90 K における電流-電圧特性を **Fig. 3** に示す。温度の上昇に伴い、

臨界電流と最大印加電圧は減少、リトラッピング電流は増加するという一般的な特性を示すが、最大印加電圧の変化が特に大きい。同様にヘリウムフロー銀ペースト、GE ワニスの場合に関しても測定を行い、冷却法による (a) 臨界

Fig. 3 Temperature dependence of I - V curves from 4.2 to 90 K for a mesa cooled directly by liquid helium.

Fig. 4 Temperature dependence of (a) critical current and (b) maximum applied voltage using the three cooling methods.

電流と (b) 最大印加電圧の温度依存性の測定結果を **Fig. 4** にまとめた。臨界電流に関しては、60 K までの温度領域において冷却法による差異はほとんど見られないが、最大印加電圧は低温領域で違いが見られ、直接冷却の場合は、間接冷却の場合よりも最大で 3 倍程度まで大きい。これは、冷却法が発振素子の自己発熱効果と強い相関関係を持つことを意味しており、冷却法の検討により素子への最大印加電圧の加減が可能である。また、自己発熱効果の影響が最も顕著に表れると考えられる GE ワニスで銅ホルダーに接着した場合には、最大印加電圧は低温から 50 K 程度までほとんど変化しない。したがって、発振素子の安定動作を考える際は、冷却法まで踏まえ、素子構造をデザインすることが重要といえる。これまで発振素子への最大印加電圧を増大させる手法としては、今回のように冷却手法を変える以外にも、①パルス印加による自己発熱効果の抑制²⁰⁾、②アンダードープ化による抵抗の温度依存性の利用⁴⁾、③接触抵抗の低減による発熱効果の抑制などが知られている。また、数値解析から発振素子内部の温度分布に関する研究も進められている²¹⁾。

2.3 複数メサの相互発熱効果

冷却法による自己発熱効果に関してより詳細に調べるため、ヘリウムフローGE ワニスとデュワーの場合に対し 2 個の発振素子を単独及び直列接続でバイアスした際の電流-電圧特性を評価した。測定に用いた発振素子は **Fig. 1(a)**に示した $400 \times 80 \times 1.5 \mu\text{m}^3$ の BSCCO メサ構造が幅方向に 160 μm 間隔で 4 つ形成された試料である。**Fig. 5** にほぼ等価な接合特性をもつ 2 つのメサを直列接続したときの間接冷却時と直接冷却時の電流-電圧特性を示す。また、図中の赤線と青線は単独バイアス時のそれぞれのメサの電圧値を足し合わせた電流-電圧特性である。測定温度はそ

Fig. 5 I - V characteristics of serially connected mesa structures using a He flow cryostat with GE varnish and Dewar.

れぞれ 10 K と 4.2 K で最大印加電圧は 1.3 V と 3.7 V 程度と 3 倍程度変化する．間接冷却時に発振素子を直列にバイアスすると、臨界電流値に変化はほとんど見られない．しかし、最大印加電圧は各メサの電圧の和に対し 120 mV 程度、割合として 9%程度減少している．これは 2 つの発振素子の相互発熱効果によって互いのメサの最大印加電圧が減少したためと考えられる．一方、液体ヘリウムで直接冷却した場合、印加電流が 40 mA を超える高電流領域では若干の相互発熱効果による印加電圧の減少が見られるものの、低電流側では減少は見られない．

3. BSCCO 微小メサ検出素子

我々のグループでは BSCCO メサ構造の金属電極直下の表面接合を利用して電磁波の検出を行っている．検出素子の光学顕微鏡写真と概略図、電流-電圧特性を Fig. 6 に示す．Fig. 6(a)(b) に示す通り、検出素子は $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ 程度の接合面積を持つ BSCCO 微小メサ構造と電極であるボウタイ型の金電極からなっており、電子線リソグラフィとアルゴンイオンミリングを用いて作製している．Fig. 6(c) に検出素子の 4.2 K における電流-電圧特性を示す．メサ構造に起因する素子の臨界電流は 480 μA だが、右側の原点近傍の拡大図に示す通りメサ構造内の一層目の表面ジョセフソ

Fig. 6 (a) Optical microscope image, (b) schematic views and (c) I - V curves of a detector mesa.

Fig. 7 Schematic diagram of an experimental setup.

ン接合は 18 μA という微小な臨界電流 (I_{c0}) を持つ．この表面接合の微小な臨界電流は外部からの電磁場放射に対して極めて鋭敏に応答する．そこで検出素子を表面接合の臨界電流直下にバイアス点を固定しておき、外部電磁波の入射による超伝導特性の変化から、電磁波検出を行う．表面接合の超伝導特性は温度にも強く依存するため、電磁波の検出実験はすべて、液体ヘリウムで直接冷却した状態で行った．

4. 液体ヘリウム温度下での素子の発振特性

電磁波発振検出実験における測定回路の概略図を Fig. 7 に示す．発振素子と検出素子は電氣的に絶縁されており、約 1 cm 離れた距離で成す角が 45° 程度となるように治具を用いて固定されている．発振素子の印加電流を変化させながら、定電流バイアスされた検出素子の電圧信号 (V_{det}) を検出することで、電磁波の検出を行った．測定に用いた発振素子は Fig. 2~4 の電流-電圧特性の測定に用いた素子と同一で、ボロメータと分光器を用いた測定から、その発振周波数が 500 GHz 程度であることが確認された試料である．

発振検出測定の実験結果を Fig. 8 に示す．前述したように、発振素子の臨界電流の値には顕著な変化はないが、直接冷却することで最大印加電圧は増大し、間接冷却の場合の 2 倍以上の約 2.15 V という値を示した．検出素子がバックグラウンドノイズを超える応答を示した電流-電圧特性部分を赤の点線で囲んだが、特に、印加電流 5 mA、印加電圧 0.5 ~ 1.0 V の広いリトラッピング領域で、高出力の電磁波放射が確認された．この発振現象は再現性を持つものの、固有ジョセフソン接合におけるリトラッピング領域に

Fig. 8 I - V characteristics of the oscillator mesa and observed V_{det} as a function of I_{osc} and V_{osc} .

おける発振であることから、電圧状態にある接合数が大きく変化していると考えられる。そこで、ジョセフソンの関係式から発振周波数を見積もるため、ブランチ構造を慎重に走査し、最も外側の準粒子ブランチにおける発振検出測定を行った。結果を Fig. 9(a) に示す。電磁波の発振は印加電圧 1570 mV で生じており、これを素子の接合数である 800 接合で割ると、1 接合当りに約 2.0 mV の電圧が印加されていることに相当している。この発振時の印加電圧は、メサ自身を共振器とする空洞共振器モデルによる TM (2, 0) モードに対応し、幅方向に 1 波長の定在波が生じていることを示唆している。Fig. 9(b) に、ヘリウムフロー-GE ワニスで間接冷却した場合のこの素子の 30 K における電流-電圧特性と FT-IR 分光測定の結果を示す¹⁷⁾。同様の素子だが、発振時の印加電圧が大きく変化しており、FT-IR 分光測定の結果から TM (1, 0) モードに起因する発振であることが分かっている。BSCCO メサ構造からの電磁波発振は、これまで主として TM (1, 0) モードに由来する発振が調べられて

きたが、TM (2, 0) モードを観測したとする報告もあり²²⁾、直接冷却することで発振素子への印加電圧が増大し、幅方向に 1 波長の定在波が生じる TM (2, 0) モードの電磁波発振が実現したとする解釈は矛盾しない。

以上のように本研究では、冷却法を変えることで発振素子への印加電圧に依存した異なるモードの電磁波発振の可能性を示唆する結果を得た。メタルメッシュバンドパスフィルタを用いて検出した電磁波信号がテラヘルツ帯にあるか検討したものの、光学系の問題から周波数帯域の同定には至っていない。しかしながら、最近、排熱効果を高めると低温で TM (2, 0) モードに起因すると考えられる発振を観測したとする実験結果も報告されており²³⁾、本研究においても自己発熱効果を変化させることで印加電圧に大きな違いが生じ、発振特性に大きな影響を与えることが実験的に確かめられた。

5. 結言

BSCCO サブテラヘルツ発振素子を用いて冷却法による電流-電圧特性の変化を評価した。冷却法による臨界電流値の違いはほとんど見られなかったものの、発振素子への最大印加電圧が液体ヘリウムによる直接冷却とヘリウムフロー型クライオスタットによる間接冷却の場合で最大で 3 倍程度異なることが分かった。また、発振素子を直列接続した際の相互発熱効果を直接冷却することである程度抑えられることが確認できた。間接冷却で 500 GHz 帯の電磁波発振が確認された発振素子を直接冷却し、BSCCO 検出素子を用いて電磁波の発振検出実験を行った結果、1.0 THz の電磁波発振を示唆する電磁場の放射を観測した。これは空洞共振器モデルにおける TM (2, 0) モードに対応し、直接冷却することで、印加電圧が増大し、高調波の発振が得られたと考えられる。

本研究は日揮・実吉奨学会の研究助成事業による助成を受けて実施されました。発振素子の作製と特性評価に関して筑波大、門脇和男教授、南英俊博士、NIMS の山本卓博士に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) R. Kleiner, F. Steinmeyer, G. Kunkel and P. Müller: "Intrinsic Josephson effects in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ single crystals," Phys. Rev. Lett. **68** (1992) 2394-2397
- 2) G. Oya, N. Aoyama, A. Irie, S. Kishida and H. Tokutaka: "Observation of Josephson junctionlike behavior in single-crystal $(\text{Bi, Pb})_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$," Jpn. J. Appl. Phys. **31** (1992) L829-L831
- 3) T. Koyama and M. Tachiki: " I - V characteristics of Josephson-coupled layered superconductors with longitudinal plasma excitations," Phys. Rev. B **5** (1996) 16183-16191
- 4) 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

Fig. 9 (a) I - V and V_{det} - V characteristics of the outermost quasiparticle branch and (b) the previously reported I - V curve and FT-IR spectra.¹⁷⁾

- coherent THz radiation from superconductors,” *Science* **318** (2007) 1291-1293
- 5) K. Kadowaki, M. Tsujimoto, K. Yamaki, T. Yamamoto, T. Kashiwagi, H. Minami, M. Tachiki and R. A. Klemm: “Evidence for a dual-source mechanism of THz radiation from rectangular mesa of single crystalline $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ intrinsic Josephson junctions,” *J. Phys. Soc. Jpn.* **79** (2010) 023703
 - 6) M. Tsujimoto, K. Yamaki, K. Deguchi, T. Yamamoto, T. Kashiwagi, H. Minami, M. Tachiki, K. Kadowaki and R.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** (2019) 037005
 - 7) K. Yamaki, M. Tsujimoto, T. Yamamoto, A. Furukawa, T. Kashiwagi, H. Minami and K. Kadowaki: “High-power terahertz electromagnetic wave emission from high- T_c superconducting $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesa structures,” *Optics Express* **19** (2011) 3193-3201
 - 8) D.Y. An, J. Yuan, N. Kinev, M.Y. Li, Y. Huang, M. Ji, H. Zhang, Z.L. Sun, L. Kang, B.B. Jin, J. Chen, J. Li, B. Gross, A. Ishii, K. Hirata, T. Hatano, V.P. Koshelets, D. Koelle, R. Kleiner, H.B. Wang, W.W. Xu and P.H. Wu: “Terahertz emission and detection both based on high- T_c superconductors: towards an integrated receiver,” *Appl. Phys. Lett.* **102** (2013) 092601
 - 9) T.M. Benseman, K.E. Gray, A.E. Koshelev, W.-K. Kwok, U. Welp, H. Minami, K. Kadowaki and T. Yamamoto: “Powerful terahertz emission from $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesa arrays,” *Appl. Phys. Lett.* **103** (2013) 022602
 - 10) U. Welp, K. Kadowaki and R. Kleiner: “Superconducting emitters of THz radiation,” *Nat. Photon.* **7** (2013) 702-710
 - 11) S. Sekimoto, C. Watanabe, H. Minami, T. Yamamoto, T. Kashiwagi, Richard A. Klemm and K. Kadowaki: “Continuous 30 μW terahertz source by a high- T_c superconductor mesa structure,” *Appl. Phys. Lett.* **103** (2013) 182601
 - 12) H.B. Wang, S. Guenon, J. Yuan, A. Iishi, S. Arisawa, T. Hatano, T. Yamashita, D. Koelle and R. Kleiner: “Hot spots and waves in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ intrinsic Josephson junction stacks: a study by low temperature scanning laser microscopy,” *Phys. Rev. Lett.* **102** (2009) 017006
 - 13) M. Li, J. Yuan, N. Kinev, J. Li, B. Gross, S. Guénon, A. Ishii, K. Hirata, T. Hatano, D. Koelle, R. Kleiner, V.P. Koshelets, H.B. Wang and P. Wu: “Linewidth dependence of coherent terahertz emission from $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ intrinsic Josephson junction stacks in the hot-spot regime,” *Phys. Rev.* **B 86** (2012) 060505
 - 14) I. Kakeya, Y. Omukai, T. Yamamoto, K. Kadowaki and M. Suzuki: “Effect of thermal inhomogeneity for terahertz radiation from intrinsic Josephson junction stacks of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$,” *Appl. Phys. Lett.* **100** (2012) 242603
 - 15) T.M. Benseman, A.E. Koshelev, W.-K. Kwok, U. Welp, V.K. Vlasko-Vlasov, K. Kadowaki, H. Minami and C. Watanabe: “Direct imaging of hot spots in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesa terahertz sources,” *J. Appl. Phys.* **113** (2013) 133902
 - 16) H. Minami, C. Watanabe, K. Sato, S. Sekimoto, T. Yamamoto, T. Kashiwagi, R.A. Klemm and K. Kadowaki: “Local SiC photoluminescence evidence of hot spot formation and sub-THz coherent emission from a rectangular $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesa,” *Phys. Rev.* **B 89** (2014) 054503
 - 17) 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** (2012) 010113
 - 18) D. Oikawa, A. Irie, K. Yamaki, G. Oya: “Terahertz electromagnetic radiation from $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ intrinsic Josephson junction stack,” *Physics Procedia* **27** (2012) 312-315
 - 19) D. Oikawa, A. Irie, K. Yamaki: “Size Dependence of Terahertz Electromagnetic Wave Radiation from Intrinsic Josephson Junctions,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **23** (2013) 1500604
 - 20) J.C. Fenton, P.J. Thomas, G. Yang and C.E. Gough: “System for fast time-resolved measurements of c-axis quasiparticle conductivity in intrinsic Josephson junctions of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$,” *Appl. Phys. Lett.* **80** (2002) 2535
 - 21) A. Yurgens: “Temperature distribution in a large $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesa,” *Phys. Rev.* **B 83** (2011) 184501
 - 22) T. Kashiwagi, K. Yamaki, M. Tsujimoto, K. Deguchi, N. Orita, T. Koike, R. Nakayama, H. Minami, T. Yamamoto, R. A. Klemm, M. Tachiki and K. 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.* **80** (2011) 094709
 - 23) H. Minami, S. Sekimoto, Y. Shibano, T. Kitamura, T. Kashiwagi, C. Watanabe, K. Nakade, K. Ishida, K. Asanuma, T. Yasui, Y. Saiwai, T. Yamamoto and K. Kadowaki: “High- T_c superconducting terahertz emitters working at high temperature,” *Abstracts of 61st JSAP Spring Meeting* (2014) 18p-D1-17
- 南 英俊, 関本俊佑, 柴野雄紀, 北村健郎, 柏木隆成, 渡辺千春, 中出蔵馬, 石田和也, 浅沼健太郎, 安居昂紀, 幸良彦, 山本 卓, 門脇和男: 「高温超伝導テラヘルツ波発振デバイスの高温動作」 2014 年第 61 回応用物理学会春季学術講演会概要集 (2014) 18p-D1-17
-
- 八 巻 和 宏 1983 年 6 月生。2005 年筑波大学第三学群工学基礎学類卒業。2007 年同大学院数理物質科学研究科博士前期課程 (物性・分子工学専攻) 修了。2010 年同大学院数理物質科学研究科博士後期課程 (物性・分子工学専攻) 修了。2010 年東京理科大学理工学部電気電子情報工学科嘱託助教、半導体赤外線センサの研究に従事。2011 年より宇都宮大学大学院工学研究科勤務。主に超伝導材料の結晶成長、高周波応用に従事。日本物理学会、日本応用物理学会会員。博士 (工学)。
- 田 村 晃 一 1989 年 5 月生。2012 年 3 月宇都宮大学工学部電気電子工学科卒業。2014 年 3 月同大学院工学研究科電気電子システム工学専攻修了。超伝導体の高周波応用に関する研究に従事。日本応用物理学会会員。修士 (工学)。
- 入 江 晃 亘 1963 年 11 月生。1992 年長岡技術科学大学大学院環境工学専攻博士課程修了。1992 年宇都宮大学工学部電気電子工学科助手、2000 年同助教。2008 年同工学研究科電気電子システム工学専攻准教授。2009 年より同教授。主に超伝導材料エレクトロニクスに関する研究に従事。日本応用物理学会、電気学会会員。博士 (工学)。