

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 23 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26790032

研究課題名(和文) 超伝導コヒーレントテラヘルツ光源の高出力化と応用

研究課題名(英文) Establishment and Applications of High-power Superconducting Coherent Terahertz Sources

研究代表者

辻本 学 (TSUJIMOTO, MANABU)

筑波大学・数理物質系・助教

研究者番号：20725890

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)：銅酸化物高温超伝導体の固有ジョセフソン接合を使ったコヒーレントな連続テラヘルツ光源の高出力化、および光源の実用化を視野に入れた応用研究を展開した。温度分布イメージング装置の構築によって光源表面の温度分布の可視化実験に成功し、局所的な温度上昇(ホットスポット)がテラヘルツ波出力を抑制する機構を解明した。温度分布を動的に制御し最適化することで出力が向上することを示した。また実験から得られた知見を応用し、排熱を最適化したパッケージ部品の製作を行った。

研究成果の概要(英文)：To enhance the emission power of the CW terahertz sources using intrinsic Josephson junctions in cuprate high-temperature superconductors, we investigate the universal relationship between the hot-spot size and the intensity of terahertz radiation by dynamically controlling the surface temperature distributions. We used a fluorescent technique to directly image temperature distributions of the emitting sources. We find a strong positive correlation between the emission intensity and the volume of the superconducting parts, and that we can increase emission intensity considerably by preventing the excessive heating that increases hot-spot size. This finding allows for the construction of powerful sources capable of emitting intense terahertz waves.

研究分野：超伝導工学

キーワード：高温超伝導体 ジョセフソン効果 テラヘルツ波 温度分布イメージング

1. 研究開始当初の背景

電磁波を周波数で分類すると、電波と光の間には未開拓領域のテラヘルツ帯が存在する。最近、テラヘルツ帯の電磁波であるテラヘルツ波を使ったさまざまな応用が提案されている。例えばテラヘルツ(1 THz = 1012 Hz)が水素結合などの分子間相互作用の固有振動数と同程度であることから、テラヘルツ波に対する物質の応答を調べれば構造解析や同定が簡単に行える。これは分子分析、薬学、医学、環境計測などへの応用につながる。X線に比べて分析試料へのダメージがほとんどないことは、生体材料など従来では取り扱いにくかった材料の分析にも役立つ。高い透過性とレンズやミラーによって空間を自由に取り回せる性質は、セキュリティ利用、工業材料の検査、美術品の非破壊検査などのイメージング応用に適している。実際、空港のセキュリティ検査ではパッシブ方式のテラヘルツポedisキャナーが導入され始めている。情報通信工学分野ではテラヘルツ波を使った超高速無線通信応用が展開されつつある。このように、テラヘルツ波が有用であることは古くから認識されていたが、信頼できる小型光源がほとんど存在しないことがその利用を阻害してきた。この技術的ギャップを埋めることは、材料科学、生命科学、環境科学、医療、薬学など、幅広い分野の発展促進につながるため重要である。

研究代表者は、ビスマス系銅酸化物高温超伝導体に内在する固有ジョセフソン接合を使ったテラヘルツ光源の開発に取り組んでいる。これまで、テラヘルツ発振を引き起こす幾何学的メサ空洞共振効果の発見や広帯域周波数連続可変性の実証など、現象の物理的解釈に加えて小型光源としての優れた性能を示してきた。現在までに得られている0.6ミリワット出力は目標値の1ミリワットを依然として下回り、実用的な光源としてはさらなる高出力化が要求される。そこで代表者は、出力を頭打ちにしている原因を素子特性のばらつきや動作温度依存性の観点から考察したところ、バイアス印加にともなう莫大な自己ジュール発熱がテラヘルツ波の出力を抑制しているという確証を得ることができた。自己発熱特性および局所的な温度上昇の問題は光源の実用化を達成するためにも解決が必須である。

2. 研究の目的

本研究の目的はビスマス系銅酸化物高温超伝導体の固有ジョセフソン接合を使ったコヒーレントな連続テラヘルツ光源の高出力化、および実用化を視野に入れた応用研究である。背景で述べたように、局所温度分布計測による自己発熱特性の評価を通じてテラヘルツ波の出力を抑制している原因を突き止め、発熱特性の改善を施した光源を実際に作製して高出力化を実証する。

3. 研究の方法

研究の方法として、(1)温度分布イメージング装置を使った自己発熱特性の評価、(2)発熱を考慮したテラヘルツ波発生メカニズムの解明、および(3)排熱を最適化した高出力光源パッケージの実装、の3ステップを設定した。それぞれの研究方法について以下で詳しく記述する。

(1)蛍光イメージング法を応用した温度分布イメージング装置を構築し、局所温度分布計測を実施して自己発熱特性に関する情報を収集する。この計測手法は並列信号処理技術と画像解析アルゴリズムを組み合わせることでコンパクトな構成で実現できる上に、極低温環境でも蛍光強度が温度敏感な蛍光物質ユウロピウム錯体を温度マーカーとして用いるため高感度な測定が可能である。

(2)上で構築した温度分布イメージング装置を用いて、局所的な温度上昇とテラヘルツ波出力の関係を実験的に明らかにする。例えば複数の電極を配置した光源で局所発熱の空間均一性を意図的に崩し、放射されるテラヘルツ波出力と温度分布の対応を調べるなどが有効である。得られた実験結果から、テラヘルツ波発振が起こる際の超伝導体内部の熱的・電磁氣的応答について考察する。超伝導という量子力学的な系と温度(熱)という古典的な物理量を結びつけるモデルは少なく、本研究はその最初の試みとして意義がある。先行研究で提唱されているいくつかの数理モデルについても検証を行う。

(3)上記2つの研究によって得られた知見を踏まえ、実際に高出力なテラヘルツ波を発生させられる光源の実装を行う。排熱を促す構造を導入したパッケージ部品を製作し、さまざまな角度からテストする。パッケージ化によって半導体LED光源のように取扱いが簡単になるばかりでなく、化学的・物理的安定性が大幅に向上することが見込まれる。

4. 研究成果

まず当初の計画通り、蛍光イメージング法を応用した温度分布イメージング装置を構築し、光源の局所的な温度上昇(ホットスポット)の可視化実験に成功した。素子表面の温度分布を計測しながらテラヘルツ波出力を同時モニターし、ホットスポットや不均一な温度分布が発振に与える影響を詳しく調べた。最大出力は固有ジョセフソン接合数の二乗に比例することが知られているが、接合数をおよそ2,000層よりも多くするとジュール発熱も増え、高温超伝導体単結晶の低い熱伝導率も相まって超伝導状態が破壊されてしまう。本研究によって、この自己ジュール発熱が光源の出力を決める要因であることが明らかになった。さらに、2つの電極から注入する電流量を分流回路で調節することで温度分布を変化させ、温度分布とテラヘルツ波強度の関係を調べた。その結果、ホットスポットが巨大化したときにテラヘルツ波

の出力が連続的に抑制される様子を観察した。この素子においては、電流・温度分布を最適化することで最大 20 パーセントの高出力化を実証した。連成解析物理シミュレーターを使った数値解析では電極を介した排熱が高出力化を助長することを明らかにした。

研究期間の後半では、前半で得られた知見を生かし、排熱機構を最適化したテラヘルツ光源パッケージ部品の製作を行った。パッケージによって市販されている LED 光源のように取り扱いを簡略化することができた。光源部が強固な熱浴部に埋め込まれているため構造は安定しており、熱的環境の再現性が保証されている。また電極および超伝導体が特性劣化を招く空気・水蒸気に直接触れることがない構造のため、部品の経時劣化は極限まで抑えることができる。製作したパッケージ部品はイメージング応用、分析応用、通信応用などにおいて威力を発揮することが期待される。

本研究の主な成果は、アメリカ物理学会の *Physical Review Applied* 誌において筆頭論文として掲載されている（雑誌論文）[1]、学術雑誌における解説 1 編に加え、国際学会の筆頭プロシーディングス 1 編も公開された。応用物理学会秋季学術講演会および超伝導に関する国際学会 THz-Plasma2014 では招待講演を行った。国際学会と国内学会ではそれぞれ 5 件（うち口頭 2 件）と 8 件（うち口頭 6 件）の発表を行った。成果は日刊工業新聞で紹介され、京都大学ホームページではプレスリリースされた。パッケージ化に関する発明では 1 件の特許出願を行った。

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 13 件)

- [1] M. Tsujimoto, I. Kakeya, T. Kashiwagi, H. Minami, and K. Kadowaki
“Cavity mode identification for coherent terahertz emission from high-Tc superconductors”
Opt. Express **24**, 4591-4599 (2016).
DOI : 10.1364/OE.24.004591
査読：有り
- [2] 辻本学
“高温超伝導体からのコヒーレントな連続テラヘルツ波の発生”
京都大学低温物質科学研究センター誌 第 27 号, 「研究ノート」, p.10-18, 2015 年 12 月
URL :
<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/105/20/10.1063/1.4902336>
査読：有り
- [3] T. Kashiwagi, T. Yamamoto, H. Minami,

M. Tsujimoto, R. Yoshizaki, K. Delfanazari, T. Kitamura, C. Watanabe, K. Nakade, T. Yasui, K. Asanuma, Y. Saiwai, Y. Shibano, T. Enomoto, H. Kubo, K. Sakamoto, T. Katsuragawa, B. Marković, J. Mirković, R. A. Klemm, and K. Kadowaki
“Efficient fabrication of intrinsic-Josephson-junction terahertz oscillators with greatly reduced self-heating effects”
Phys. Rev. Applied **4**, 054018-(1-16) (2015).
DOI : 10.1103/PhysRevApplied.4.054018
査読：有り

- [4] M. Tsujimoto, Y. Maeda, H. Kambara, A. Elarabi, Y. Yoshioka, Y. Nakagawa, Y. Wen, T. Doi, H. Saito, and I. Kakeya
“Terahertz emission from a stack of intrinsic Josephson junctions in Pb-doped $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ ”
Supercond. Sci. Technol. **28**, 105015-(1-5) (2015).
DOI : 10.1088/0953-2048/28/10/105015
査読：有り
- [5] 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, and K. Kadowaki
“A high- T_c intrinsic Josephson junction emitter tunable from 0.5 to 2.4 terahertz”
Appl. Phys. Lett. **107**, 082601-(1-5) (2015).
DOI : 10.1063/1.4929715
査読：有り
- [6] H. Akiyama, S. Pyon, T. Tamegai, M. Tsujimoto, and I. Kakeya
“Thermal imaging of $\text{Bi}2212$ THz oscillator”
Physica C **518**, 77-80 (2015).
(Proceedings of the 27th International Symposium on Superconductivity)
DOI : 10.1016/j.physc.2015.06.005
査読：有り
- [7] K. Delfanazari, H. Asai, M. Tsujimoto, T. Kashiwagi, T. Kitamura, T. Yamamoto, W. Wilson, R. A. Klemm, T. Hattori, and K. Kadowaki
“Effect of bias electrode position on terahertz radiation from pentagonal mesas of superconducting $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ ”
IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. **5**, 505-511 (2015).
DOI : 10.1109/TTHZ.2015.2409552

- 査読：有り
- [8] B. Gross, F. Rudau, N. Kinev, M. Tsujimoto, J. Yuan, Y. Huang, M. Ji, X. J. Zhou, D. Y. An, A. Ishii, P. H. Wu, T. Hatano, D. Koelle, H. B. Wang, V. P. Koshelets, and R. Kleiner
“ Electrothermal behavior and terahertz emission properties of a planar array of two $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ intrinsic Josephson junction stacks ”
Supercond. Sci. Technol. **28**, 055004-(1-10) (2015).
DOI : 10.1088/0953-2048/28/5/055004
査読：有り
- [9] F. Rudau, M. Tsujimoto, B. Gross, T. E. Judd, R. Wieland, E. Goldobin, N. Kinev, J. Yuan, Y. Huang, M. Ji, X. J. Zhou, D. Y. An, A. Ishii, R. G. Mints, P. H. Wu, T. Hatano, H. B. Wang, V. P. Koshelets, D. Koelle, and R. Kleiner
“ Thermal and electromagnetic properties of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ intrinsic Josephson junction stacks studied via one-dimensional coupled sine-Gordon equations ”
Phys. Rev. B **91**, 104513-(1-16) (2015).
DOI : 10.1103/PhysRevB.91.104513
査読：有り
- [10] T. Kashiwagi, T. Yamamoto, T. Kitamura, K. Asanuma, C. Watanabe, K. Nakade, T. Yasui, Y. Saiwai, Y. Shibano, H. Kubo, K. Sakamoto, T. Katsuragawa, M. Tsujimoto, K. Delfanazari, R. Yoshizaki, H. Minami, R. A. Klemm, and K. Kadowaki
“ Generation of electromagnetic waves from 0.3 to 1.6 terahertz with a high-Tc superconducting $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ intrinsic Josephson junction emitter ”
Appl. Phys. Lett. **106**, 092601-(1-5) (2015).
DOI : 10.1063/1.4914083
査読：有り
- [11] M. Tsujimoto, H. Kambara, Y. Maeda, Y. Yoshioka, Y. Nakagawa, and I. Kakeya
“ Imaging of local temperature distributions in mesas of high-Tc superconducting terahertz sources ”
J. Phys.: Conf. Ser. **568**, 022048-(1-5) (2014).
(Proceedings of the 27th International Conference on Low Temperature Physics)
DOI : 10.1088/1742-6596/568/2/022048
査読：有り
- [12] T. Kitamura, T. Kashiwagi, T. Yamamoto, M. Tsujimoto, C. Watanabe, K. Ishida, S. Sekimoto, K. Asanuma, T. Yasui, K. Nakade, Y. Shibano, Y. Saiwai, H. Minami, R. A. Klemm, and K. Kadowaki
“ Broadly tunable, high-power terahertz radiation up to 73K from a stand-alone $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ mesa ”
Appl. Phys. Lett. **105**, 202603-(1-4) (2014).
DOI : 10.1063/1.4902336
査読：有り
- [13] M. Tsujimoto, H. Kambara, Y. Maeda, Y. Yoshioka, Y. Nakagawa, and I. Kakeya
“ Dynamic control of temperature distributions in stacks of intrinsic Josephson junctions in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ for intense terahertz radiation ”
Phys. Rev. Applied **2**, 044016-(1-6) (2014).
DOI : 10.1103/PhysRevApplied.2.044016
査読：有り
- [学会発表](計18件)
- [1] 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 III ”
日本物理学会第 71 回年次大会
東北学院大学 (宮城県仙台市)
2016 年 3 月 22 日
- [2] 辻本学, 齊藤寛, 土居卓司, 温一凡, Asem Elarabi, 掛谷一弘, 足立伸太郎, 渡辺孝夫
“ $\text{Bi}-2223$ 固有ジョセフソン接合を使ったテラヘルツ発振の検証 ”
日本物理学会第 71 回年次大会
東北学院大学 (宮城県仙台市)
2016 年 3 月 22 日
- [3] 土居卓司, 辻本学, Elarabi Asem, 温一凡, 掛谷一弘
“ 高温超伝導体 $\text{Bi}2212$ を用いたテラヘルツ波光源のパッケージ化 ”
第 63 回応用物理学会春季学術講演会
東京工業大学 (東京都目黒区)
2016 年 3 月 20 日
- [4] 掛谷一弘, エララビアセム, 温一凡, 土居卓司, 辻本学
“ 高温超伝導体 $\text{Bi}2212$ テラヘルツ光源の多機能化 ”
第 63 回応用物理学会春季学術講演会
東京工業大学 (東京都目黒区)
2016 年 3 月 19 日

- [5] 久保裕之, 柏木隆成, 坂本和輝, 北村健郎, 渡邊千春, 幸良彦, 柴野雄紀, 桂川拓也, 田中大河, 湯浅拓実, 小守優貴, 榎本拓真, 辻本学, 山本卓, 南英俊, 門脇和男
“高温超伝導体単結晶 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ を用いた正方形型単独メサ構造からの THz 波発振特性 II ”
第 63 回応用物理学会春季学術講演
東京工業大学 (東京都目黒区)
2016 年 3 月 19 日
- [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, T. Tanaka, T. Yuasa, M. Tsujimoto, R. Yoshizaki, T. Yamamoto, H. Minami, R.A. Klemm, and K. Kadowaki
“A high T_c superconducting terahertz emitter operated from 0.5 to 2.4 THz ”
2016 American Physical Society March Meeting
Baltimore (アメリカ)
2016 年 3 月 16 日
- [7] M. Tsujimoto, I. Kakeya, S. Adachi, T. Watanabe, T. Kashiwagi, H. Minami, and K. Kadowaki
“Terahertz emission from a stack of intrinsic Josephson junctions in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$ ”
2016 American Physical Society March Meeting
Baltimore (アメリカ)
2016 年 3 月 16 日
- [8] 辻本学, 齊藤寛, 土居卓司, 温一凡, Asem Elarabi, 掛谷一弘
“高温超伝導体を使ったコヒーレントな連続テラヘルツ光源の開発 ”
第 14 回低温工学・超伝導若手合同講演会
大阪市立大学文化交流センター (大阪府大阪市)
2015 年 12 月 11 日
- [9] 辻本学, 齊藤寛, 土居卓司, 温一凡, Asem Elarabi, 掛谷一弘
“Bi-2212 固有ジョセフソン接合テラヘルツ発振におけるストライプ状微細発振構造に関する考察 ”
第 23 回渦糸物理国内会議
休暇村志賀島 (福岡県福岡市)
2015 年 12 月 9 日
- [10] 辻本学, 齊藤寛, 土居卓司, 温一凡, Asem Elarabi, 掛谷一弘, Fabian Rudau, Raphael Wieland, Reinhold Kleiner
“ $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ 固有ジョセフソン接合からのテラヘルツ波発生におけるストライプ状微細発振構造の起源 ”
日本物理学会 2015 年秋季大会
関西大学 (大阪府吹田市)
2015 年 9 月 18 日
- [11] 辻本学, 掛谷一弘
“ $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ 固有ジョセフソン接合からのコヒーレントな連続テラヘルツ波発生 ”
京都大学基礎物理学研究所研究会「多自由度と相関効果が生み出す超伝導の新潮流 ~BSC から BEC まで~」
京都大学 (京都府京都市)
2015 年 6 月 9 日
- [12] 辻本学, 神原仁志, 岸本卓也, 温一凡, 吉岡佑介, 中川裕也, 秋山弘樹, 卞舜生, 為ヶ井強, Fabian Rudau, Raphael Wieland, Reinhold Kleiner, 掛谷一弘
“ $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ 固有ジョセフソン接合メサ構造における温度分布の動的制御とテラヘルツ発振の同時観測 ”
日本物理学会第 70 回年次大会
早稲田大学 (東京都新宿区)
2015 年 3 月 24 日
- [13] M. Tsujimoto, H. Kambara, T. Kishimoto, Y. Wen, Y. Yoshioka, Y. Nakagawa, and I. Kakeya
“Dynamic control of temperature distributions in stacks of intrinsic Josephson junctions for intense terahertz emission ”
6th International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology
San Diego (アメリカ)
2015 年 3 月 11 日
- [14] 辻本学, 吉岡佑介, 温一凡, 岸本卓也, 齊藤寛, 中川裕也, 掛谷一弘
“高温超伝導体を使った連続可変な小型テラヘルツ光源の開発 ”
応用物理学会関西支部平成 26 年度第 3 回講演会「関西発グリーンエレクトロニクス研究の進展」
奈良先端科学技術大学院大学 (奈良県生駒市)
2015 年 2 月 27 日
- [15] M. Tsujimoto, H. Kambara, Y. Maeda, Y. Yoshioka, Y. Nakagawa, and I. Kakeya
“Terahertz emission from a stack of intrinsic Josephson junctions in Pb-doped Bi-2212 ”
9th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and THz Plasma Oscillations in High- T_c Superconductors
京都大学 (京都府京都市)
2014 年 12 月 2 日
- [16] M. Tsujimoto, H. Kambara, Y. Maeda,

Y. Yoshioka, Y. Nakagawa, B. Gross, F. Rudau, R. Kleiner, and I. Kakeya
“ Dynamic control of temperature distributions in stacks of intrinsic Josephson junctions in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ for intense terahertz radiation ”
9th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and THz Plasma Oscillations in High-Tc Superconductors
京都大学 (京都府京都市)
2014 年 12 月 1 日

<http://www.nikkan.co.jp/news/nkx0720141023eaam.html>

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

辻本 学 (TSUJIMOTO , Manabu)
筑波大学・数理物質系・助教
研究者番号 : 2 0 7 2 5 8 9 0

[17] 辻本学, 神原仁志, 吉岡佑介, 中川裕也, F. Rudau, B. Gross, R. Kleiner, 掛谷一弘
“ $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ 固有ジョセフソン接合を用いた超伝導テラヘルツ光源の開発 ”
第 75 回応用物理学会秋季学術講演会
北海道大学 (北海道札幌市)
2014 年 9 月 18 日

[18] M. Tsujimoto, Y. Nakagawa, Y. Yoshioka, Y. Kamei, Y. Maeda, and I. Kakeya
“ Imaging of local temperature distributions in mesas of high-Tc superconducting terahertz sources ”
27th International Conference on Low Temperature Physics
Buenos Aires (アルゼンチン)
2014 年 8 月 8 日

[産業財産権]

出願状況 (計 1 件)

- [1] 名称 : テラヘルツ帯電磁波発振装置
発明者 : 辻本学, 掛谷一弘
権利者 : 京都大学
種類 : 特願 2015-246505
出願年月日 : 2015 年 12 月 17 日
国内外の別 : 国内

[その他]

ホームページ等

- [1] 京都大学プレスリリース
「 高温超伝導体を用いた新しいテラヘルツ光源における温度分布の可視化と制御に成功 - 小型コヒーレントテラヘルツ光源の実現につながる重要な手がかり - 」
日付 : 2014 年 10 月 22 日
URL :
http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2014/141022_1.html

[2] 新聞掲載

新聞名 : 日刊工業新聞
記事名 : 『テラヘルツ光源 温度分布を可視化 高出力装置設計に道』
日付 : 2014 年 10 月 23 日付 (19 面)
URL :