

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289108

研究課題名(和文)単色・広帯域周波数可変(0.3～3THz)固有ジョセフソン連続波発振器

研究課題名(英文)Coherent, wide-range tunable (0.3-3THz) continuous THz-wave generator using intrinsic Josephson junctions

研究代表者

WANG Huabing (WANG, Huabing)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・超伝導物性ユニット・主幹研究員

研究者番号：70421427

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：両面を金電極で挟んだ構造のBi2Sr2CaCu2O8固有ジョセフソン素子を開発した。金電極に接合部の発熱を有効に逃がすことにより、低温・温度均一を維持し、放射波の周波数および周波数可変幅の大幅増加に成功した。THz発振する固有ジョセフソン・スタックの共鳴様式を走査型低温レーザー顕微鏡で可視化すること、同時に放射THz波を外部検出器で測定することに成功した。

固有ジョセフソンTHz発振素子は実用レベルに到達し、ガス成分分析・電波天文学・実験室応用可能なTHz光源が実現されている。THz放射出力は1スタックから100μWに達し、周波数も1.0THzを超え、動作温度も85Kにまで到達している。

研究成果の概要(英文)：1) We have combined a stand-alone Bi2Sr2CaCu2O8 (BSCCO) intrinsic Josephson junction stack, emitting terahertz radiation, with a YBa2Cu3O7 grain boundary Josephson junction acting as detector. 2) We developed a sandwich structure of BSCCO intrinsic Josephson junction stacks with improved cooling, allowing for a remarkable increase in emission frequency compared to the previous designs. 3) We utilized low temperature scanning laser microscopy (LTSLM) to visualize the EM resonance modes inside the THz emitter, and detected the emission outside the THz emitter simultaneously. 4) We fabricated a 3-terminal THz emitter, and successfully varied the emission power up to 10 times. Using LTSLM, we can increase the emission power by up to 75% by heating the sample with a focused laser beam. 5) The operation temperatures can be increased up to 85 K. Therefore, we fabricated a THz flash which can be driven by a 1.5 V battery. The operation can be in liquid nitrogen.

研究分野：電気電子工学

キーワード：マイクロ波 ミリ波 テラヘルツ波

### 1. 研究開始当初の背景

ビスマス系高温超伝導体は 1988 年に当研究機関において発見され、1992 年には日独で独立に固有ジョセフソン効果の発現が確認された。高温超伝導体の結晶構造に接合が膨大な数のアレイを形成していることから、数を利用した THz 発振素子開発に期待がかかった。コヒーレントな  $N$  接合からの放射エネルギーが  $N^2$  倍になることが期待された。即ち、1 接合では出力 1nW であっても、 $10^3$  接合では  $10^6$  倍の 1mW が得られ、THz 光源として応用に供することができる。この  $10^3$  接合が厚さ  $1.5\mu\text{m}$  の結晶に内蔵されている。すべての接合を同期発振させるために、我々は素子の形状を共振器として利用する方法を考案し (Phys. Rev. B72, 140504R (2005))、接合面内を光速の  $1/\sqrt{\epsilon}$  で伝搬する電磁波を素子の幾何学的形状で共振させる研究が盛んになった ( $\epsilon$ : 誘電率)。接合サイズ・バイアス電流・磁場強度・磁場と接合のなす角度・温度等々をパラメータとして我が国を中心に研究が進められた。当時、0.5-1THz の幾何学的共鳴発振を観測するに至った (Appl. Phys. Lett., 89, 252506 (2006))。空間への THz 外部放射観測こそ米国アルゴンヌ研究所の巨大メサの後塵を拝する結果となったが、当 G はその巨大メサ (当 G の接合スタックと比べて接合列の体積は  $10^4\sim 10^5$  倍) の THz 放射実験でも、(1)高出力化を達成した高バイアス条件の発見、(2)定在波パターン可視化 (低温レーザー顕微鏡観察) による発振様式特定、(3) ホットスポット形成の発見とそれによる周波数可変性 (前頁で挙げた 2 報の Phys. Rev. Lett., 102 と 105)、(4) ホットスポットによる分流形成 (shunt) に起因する接合コヒーレンスの向上 (Phys. Rev. B86, 060505(2012)) といったようにこの分野の発展を牽引してきた。低温レーザー顕微鏡観察により、接合の一部の温度が超伝導遷移温度を超えて常伝導状態になり、テラ

ヘルツ共鳴箱のサイズが、あたかもトロンボーンの U 字管をスライドするかのように変化することで、0.2~0.8THz といった大幅な周波数可変特性を達成した。

### 2. 研究の目的

本提案課題では、固有ジョセフソン接合における“超高周波”テラヘルツ (THz) 発振技術の研究を行う。特に当研究グループが発見し系統的な研究を行ってきた接合の平面形状をキャビティ (共鳴箱) とする“幾何学的共振” (Phys. Rev. Lett., 102, 017006 (2009), Phys. Rev. Lett., 105, 057002 (2010)) を踏まえて、非線形連成振動系である超伝導接合列の物理原則に則り、マイクロ波技術・遠赤外光学技術を総動員して、連続発振・周波数可変・狭線幅の実用レベル mW 級テラヘルツ発振技術を創生する。超高周波通信分野・超遠赤外分光分野では新原理の高性能 THz 光源が待望されている。

### 3. 研究の方法

本研究の指導原理は、交流ジョセフソン効果 ( $f = (h/2e) V$ ) と幾何学的共振条件 ( $f = mc/2\sqrt{\epsilon} L$ ) を基本に、多重接合をコヒーレントに発振させることにあり、そこで主導的役割を果たすのが、我々が発見した”hot spot”による分流形成 (shunt) である (ここで、 $f$ : 周波数、 $\epsilon$ : Bi2212 の誘電率、 $L$ : cavity 長、 $V$ : 接合間電圧、 $m$ : 共振モードの次数、 $h$ : Planck 定数、 $e$ : 電荷、 $c$ : 真空中の光速)。しかも、hot spot の電流に依存したサイズ変化に伴い、周波数可変現象を発見し、コヒーレンスの向上により狭線幅の実現が期待できる。光源の諸元を実現するための研究方法を以下に示す。

- (a) Bi2212 単結晶の浮遊帯移動法による合成
- (b) Bi2212 単結晶の精密制御

- (c) THz キャビティ加工技術の高度化
- (d) THz 放射強度（周波数）と接合平面内定在波励起モードの同時観測
- (e) 数理モデルによる大規模数値計算
- (f) 準光学系設計・アンテナ工学（電磁界解析）を適用した、放射強度の増大・指向性向上・偏光性向上の検討を行う。
- (g) THz 発振の周波数同期・位相同期。

#### 4. 研究成果

主な研究成果の概要は下記の通りである。

- (1) Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub>結晶の上下両面に金電極を蒸着したstand-alone（単独）型固有ジョセフソン接合はキャビティ形状が厳密で、かつ接合の発熱を効率的に金電極に逃がすことができるため素子の均一動作に優れ、コヒーレントな発振が期待される。これを、YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>粒界接合で検波したところ、その電流-電圧特性に7次のシャピロ・ステップまで観測された。これは0.5 THz で発振するBi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub>素子に高いコヒーレンスが実現されていることを証明している。Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub>固有ジョセフソン接合発振素子を用いた全高温超伝導体のintegrated receiver開発のマイルストーンを達成した。勿論、従来型の金属系SISミキサーでの分光にも成功している。

- (2) 両面を金電極で挟んだ構造の

Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub>固有ジョセフソン素子を開発した。金電極に接合部の発熱を有効に逃がすことにより、低温・温度均一を維持することができ、同じキャビティ形状の素子と比較して放射波の周波数、および周波数可変幅を大幅に増加させることに成功した。周波数は、1.0THzの大台を超え、可変幅は0.71THzに達した。

- (3) THz発振する固有ジョセフソン・スタックの共鳴様式を走査型低温レーザー顕微鏡で可視化することに成功し、同時に放射THz波

を外部検出器で測定することに成功した。共鳴様式を明瞭に観測することに成功しただけでなく、接合へのバイアス電流を変化させることで、共鳴パターンが変化する様子の観測に成功した。

- (4) 従来の2端子素子に代えて、3端子固有ジョセフソン素子を作成し、THz放出出力を10倍に増大させることに成功した。また、走査型低温レーザー顕微鏡で固有ジョセフソン素子の特定の位置を照射することで、放射波の出力を75%増大させることができることを発見した。
- (5) 素子の動作温度は85Kに到達させることができた。これにより、液体窒素冷却・1.5V乾電池駆動のTHz光源が実現された。

以上、まとめると、これまでの3年間の研究の積み重ねにより、固有ジョセフソンTHz発振素子は実用レベルに到達し、ガス成分分析・電波天文学・実験室応用可能なTHz光源が実現されている。THz放射出力は1スタックから100μWに達し、周波数も1.0THzを超え、動作温度も85Kにまで到達している。今後複数の接合を同期発振させることで、更なる出力の増大が見込まれる。

#### 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23件）

- (1). Itsuhiro Takeya and Huabing Wang, “Terahertz-wave emission from Bi<sub>2</sub>212 intrinsic Josephson junctions: a review on recent progress”, Supercond. Sci. Tech. 29,073001 (2016) (Topical Review). 査読有.  
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-2048/29/7/073001?fromSearchPage=true>
- (2). F. Rudau, R. Wieland, J. Langer, X. J. Zhou, M. Ji, N. Kinev, L. Y. Hao, Y. Huang, J. Li, P. H. Wu, T. Hatano, V. P. Koshelets, H. B. Wang, D. Koelle, and R. Kleiner, “3D simulations of the electrothermal and THz emission properties of Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub> intrinsic Josephson junction stacks”, Phys. Rev. Applied 5, 044017 (2016). 査読有.

- <https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.5.044017>
- (3). Jun Li, Yanfeng Guo, Zhaorong Yang, Kazunari Yamaura, Eiji Takayama- Muromachi, Huabing Wang, and Peiheng Wu, "Progress in nonmagnetic impurity doping studies on Fe-based super- conductors", *Supercond. Sci. Tech.* 29, 053001 (2016) (Topical Review). 查読有.  
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-2048/29/5/053001>
  - (4). L. Y. Hao, M. Ji, J. Yuan, D. Y. An, M. Y. Li, X. J. Zhou, Y. Huang, H. C. Sun, Q. Zhu, F. Rudau, R. Wieland, N. Kinev, J. Li\*, W. W. Xu, B. B. Jin, J. Chen, T. Hatano, V. P. Koshelets, D. Koelle, R. Kleiner\*, H. B. Wang\*, and P. H. Wu, "Compact Superconducting Terahertz Source Operating in Liquid Nitrogen", *Phys. Rev. Applied* 3, 024006 (2015). 查読有.  
<http://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.3.024006>
  - (5). Jun Li\*, Min Ji, Tobias Schwarz, Xiaoxing Ke, Gustaaf Van Tendeloo, Jie Yuan, Paulo J. Pereira, Ya Huang, Gufei Zhang, Hai-Luke Feng, Ya-Hua Yuan, Takeshi Hatano, Reinhold Kleiner, Dieter Koelle, Liviu F. Chibotaru, Kazunari Yamaura, Hua-Bing Wang\*, Pei-Heng Wu, Eiji Takayama-Muromachi, Johan Vanacken, and Victor V. Moshchalkov\*, "Local destruction of superconductivity by nonmagnetic impurities in mesoscopic iron-based superconductors", *Nature Communications* 6, 7614 (2015). 查読有.  
<http://www.nature.com/ncomms/2015/150703/ncomms8614/full/ncomms8614.html>
  - (6). Xianjing Zhou, Qiang Zhu, Min Ji, Deyue An, Luyao Hao, Hancong Sun, Shigeyuki Ishida, Fabian Rudau, Raphael Wieland, Jun Li, Dieter Koelle, Hiroshi Eisaki, Yoshiyuki Yoshida, Takeshi Hatano, Reinhold Kleiner, Huabing Wang\*, Peiheng Wu, "Three-terminal stand-alone superconducting terahertz emitter", *Appl. Phys. Lett.* 107, 122602 (2015). 查読有.  
<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/107/12/10.1063/1.4931623>
  - (7). Jun Li,\* Gufei Zhang, Wei Hu, Ya Huang, Min Ji, Han-Cong Sun, Xian-Jing Zhou, De-Yue An, Lu-Yao Hao, Qiang Zhu, Jie Yuan, Kui Jin, Hong-Xuan Guo, Daisuke Fujita, Takeshi Hatano, Kazunari Yamaura, Eiji Takayama-Muromachi, Hua-Bing Wang\*, Pei-Heng Wu, Johan Vanacken\*, and Victor V. Moshchalkov, "High upper critical fields and critical current density of superconducting Ca<sub>10</sub>(Pt<sub>4</sub>As<sub>8</sub>) (Fe<sub>1.8</sub>Pt<sub>0.2</sub>As<sub>2</sub>)<sub>5</sub> whiskers", *Appl. Phys. Lett.* 106, 262601 (2015). 查読有.  
<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/106/26/10.1063/1.4923216>
  - (8). P. Wang, M. He\*, H. Wu, M. Ji, X. J. Zhou, X. J. Zhao, T. Hatano and H. B. Wang\*, "Terahertz waves emission from two BSCCO mesas in series", *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* 5, 512 (2015). 查読有.  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=7054564&tag=1>
  - (9). X. J. Zhou, J. Yuan, H. Wu, Z. S. Gao, M. Ji, D. Y. An, Y. Huang, F. Rudau, R. Wieland, B. Gross, N. Kinev, J. Li, A. Ishii, T. Hatano, V. P. Koshelets, D. Koelle, R. Kleiner, H. B. Wang\*, and P. H. Wu, "Tuning the THz emission power of an intrinsic Josephson junction stack by a focused laser beam", *Phys. Rev. Applied* 3, 044012 (2015). 查読有.  
<http://journals.aps.org/prapplied/pdf/10.1103/PhysRevApplied.3.044012>
  - (10). Valery P. Koshelets, Member, IEEE, Pavel N. Dmitriev, Michael I. Faley, Lyudmila V. Filippenko, Konstantin V. Kalashnikov, Nickolay V. Kinev, Oleg S. Kiselev, Anton A. Artanov, Kirill I. Rudakov, Arno de Lange, G. de Lange, Vladimir L. Vaks, M. Y. Li, and Huabing Wang, "Superconducting Integrated Terahertz Spectrometers", *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* 5, 687 (2015). 查読有.  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=7140847>
  - (11). Boris Gross, Fabian Rudau, Nickolay Kinev, Manabu Tsujimoto, Jie Yuan, Ya Huang, Min Ji, Xiangjing Zhou, Deyue An, Akira Ishii, Peiheng Wu, Takeshi Hatano, Dieter Koelle, Huabing Wang, Valery Koshelets, and Reinhold Kleiner, "Electrothermal behavior and terahertz emission properties of a planar array of two Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+δ</sub> intrinsic Josephson junction stacks", *Supercond. Sci. Technol.* 28, 055004 (2015). 查読有.  
[http://iopscience.iop.org/0953-2048/28/5/055004/pdf/0953-2048\\_28\\_5\\_055004.pdf](http://iopscience.iop.org/0953-2048/28/5/055004/pdf/0953-2048_28_5_055004.pdf)
  - (12). 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, R. Kleiner, "Thermal and electromagnetic properties of Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub> intrinsic Josephson junction stacks studied via one-dimensional coupled sine-Gordon equations", *Physical Review B* 91, 104513 (2015). 查読有.  
<http://journals.aps.org/prb/pdf/10.1103/PhysRevB.91.104513>
  - (13). M. Ji, J. Yuan, B. Gross, F. Rudau, D. Y. An, M. Y. Li, X. J. Zhou, Y. Huang, H. C. Sun, Q. Zhu, J. Li, N. Kinev, T. Hatano, V. P. Koshelets, D. Koelle, R. Kleiner, W. W. Xu, B. B. Jin, H. B. Wang and P. H. Wu, "Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub> intrinsic Josephson junction stacks with improved cooling: Coherent emission above 1 THz", *Appl. Phys. Lett.* 105, 122602 (2014). 查読有.  
<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/105/12/10.1063/1.4896684>
  - (14). Jun Li, Jie Yuan, Min Ji, Gufei Zhang, Jun-Yi Ge, Hai-Luke Feng, Ya-Hua Yuan, Takeshi Hatano, Wei Hu, Kui Jin, Tobias Schwarz, Reinhold Kleiner, Dieter Koelle, Kazunari Yamaura, Hua-Bing Wang, Pei-Heng Wu, Eiji Takayama-Muromachi, Johan Vanacken, and Victor V. Moshchalkov, "Impurity effects on the normal-state transport properties of

- Ba<sub>0.5</sub>K<sub>0.5</sub>Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> superconductors”, Phys. Rev. B 90, 024512 (2014). 査読有。  
<http://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.90.024512>
- (15). J. Ge, J. Gutierrez, J. Li, J. Yuan, H.-B. Wang, K. Yamaura, E. Takayama- Muromachi, and V. V. Moshchalkov, Dependence of the flux-creep activation energy on current density and magnetic field for a Ca<sub>10</sub>(Pt<sub>3</sub>As<sub>8</sub>) [(Fe<sub>1-x</sub>Ptx)<sub>2</sub>As<sub>2</sub>]<sub>5</sub> single crystal, Appl. Phys. Lett. 104 (11), 112603(1-5) (2014). 査読有。  
<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/104/11/10.1063/1.4868871>
- (16). Jingbo Wu, Caihong Zhang, Lanju Liang, Biaoqing Jin, Iwao Kawayama, Hironaru Murakami, Lin Kang, Weiwei Xu, Huabing Wang, Jian Chen, Masayoshi Tonouchi and Peiheng Wu, “Nonlinear terahertz superconducting plasmonics”, Appl. Phys. Lett. 105, 162602 (2014). 査読有。  
<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/105/16/10.1063/1.4898818>
- (17). J. Ge, J. Gutierrez, J. Li, J. Yuan, H.-B. Wang, K. Yamaura, E. Takayama- Muromachi, and V. V. Moshchalkov, “Peak effect in optimally doped p-type single- crystal Ba<sub>0.5</sub>K<sub>0.5</sub>Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> studied by ac magnetization measurements”, Phys. Rev. B 88, 144505(1-7) (2013). 査読有。  
<http://journals.aps.org/prb/pdf/10.1103/PhysRevB.90.184511>
- (18). B. Gross, J. Yuan, D. Y. An, M. Y. Li, N. Kinev, X. J. Zhou, M. Ji, Y. Huang, T. Hatano, R. G. Mints, V. P. Koshelets, P. H. Wu, H. B. Wang, D. Koelle, and R. Kleiner, “Modeling the linewidth dependence of coherent terahertz emission from intrinsic Josephson junction stacks in the hot-spot regime”, Phys. Rev. B 88, 014524 (2013). 査読有。  
<http://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.88.014524>
- (19). Iwao Kawayama, Caihong Zhang, Huabing Wang and Masayoshi Tonouchi, “Superconducting Terahertz Sources and Ultrafast Optical Responses of Super- conductors”, Supercond. Sci. Technol. 26 093002 (2013). 査読有。  
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-2048/26/9/093002/meta>
- (20). Jun Li, Jie Yuan, Ya-Hua Yuan, Jun-Yi Ge, Meng-Yue Li, Hai-Luke Feng, Paulo J. Pereira, Akira Ishii, Takeshi Hatano, Alejandro V. Silhanek, Johan Vanacken, Kazunari Yamaura, Hua-Bing Wang, Eiji Takayama-Muromachi, and Victor V. Moshchalkov, “Direct observation of the depairing current density in single-crystalline Ba<sub>0.5</sub>K<sub>0.5</sub>Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> micro bridge with nanoscale thickness”, Appl. Phys. Lett. 103, 062603 (2013). 査読有。  
[http://apl.aip.org/resource/1/applab/v103/i6/p062603\\_s1](http://apl.aip.org/resource/1/applab/v103/i6/p062603_s1)
- (21). 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-Tc superconductors: Towards an integrated receiver”, Appl. Phys. Lett. 102, 092601 (2013). (Corresponding author) 査読有。  
<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/102/9/10.1063/1.4794072>
- (22). F. Turkoglua, L. Ozyuzer, H. Koseoglua, Y. Demirhana, S. Preub, S. Malzer, Y. Simsek, H. B. Wang, P. Muller, “Emission of the THz waves from large area mesas of superconducting Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub>+d by the injection of spin polarized current”, Physica C 491, 7-10 (2013). 査読有。  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921453413000178>
- (23). S. Saini, H. B. Wang, T. Hatano, S.-J. Kim, “An Approach to Use a Raw Single Crystal Whisker as Intrinsic Josephson Junctions Stack”, J. Supercond. Nov. Magn. 26, 2709–2712 (2013). 査読有。  
<https://www.infona.pl/resource/bwmetal.element.springer-fa657cd7-f3bc-3461-b82e-0b2265904c85>
- [学会発表] (計 12 件)
- (1). L. Y. Hao, M. Ji, X. J. Zhou, D. Y. An, Y. Huang, F. Rudau, R. Wieland, J. Li, W. W. Xu, T. Hatano, V. P. Koshelets, D. Koelle, R. Kleiner, H. B. Wang\*, and P. H. Wu, “Superconducting Terahertz Flashlight Operating in Liquid Nitrogen”, ISEC2015, Nagoya, July 6-9, 2015. (invited)
- (2). X. J. Zhou\*, M. Ji, D. Y. An, Y. Huang, H. C. Sun, Q. Zhu, L. Y. Hao, F. Rudau, J. Li, T. Hatano, V. P. Koshelets, D. Koelle, R. Kleiner, H. B. Wang, and P. H. Wu, “Manipulating a Superconducting Terahertz Emitter with a Focused Laser”, ISEC2015, Nagoya, July 6-9, 2015 (poster).
- (3). H. B. Wang\*, X. J. Zhou, M. Ji, Y. Huang, D. Y. An, N. Kinev, A. Sobolev, B. Gross, F. Rudau, T. Hatano, V. P. Koshelets, D. Koelle, R. Kleiner, W. W. Xu, and P. H. Wu, “Some efforts on improving performance and understanding mechanism of THz emission in intrinsic Josephson junctions”, THz-plasma2014, Kyoto, Japan, Nov. 30 to Dec. 3, 2014. (Invited)
- (4). X. J. Zhou, J. Yuan, B. Gross, F. Rudau, M. Ji, D. Y. An, Y. Huang, J. Li, T. Hatano, D. Koelle, R. Kleiner, H. B. Wang, and P. H. Wu, “Manipulating terahertz emission of intrinsic Josephson junctions with a focused laser spot”, THz-plasma2014, Kyoto, Japan, Nov. 30 to Dec. 3, 2014. (Best poster with silver award)
- (5). M. Ji, Y. Huang, X. J. Zhou, D. Y. An, P. Wang, N. Kinev, A. Sobolev, B. Gross, T. Hatano, V. P. Koshelets, R. Kleiner, W. W. Xu, H. B. Wang\*, and P. H. Wu, “Continuous Wave Coherent Terahertz Radiation Above 1 THz From Josephson Junction Arrays”, IRMMW-THz2014, Tucson, Arizona, USA, Sept. 14-19, 2014.

- (6). D. Y. An, M. Ji, X. J. Zhou, Y. Huang, M. Yu, M. Y. Zhang, T. Hatano, N. Kinev, V. P. Koshelets, D. Koelle, R. Kleiner, J. Chen, W. W. Xu, H. B. Wang\*, and P. H. Wu, "A Grain Boundary Josephson Junction as a Mixer to Evaluate Terahertz Emission from Intrinsic Josephson Junctions" IRMMW-THz2014, Tucson, Arizona, USA, Sept. 14-19, 2014. (poster)
- (7). D. Y. An, J. Yuan, N. Kinev, M. Y. Li, Y. Huang, M. Ji, B. Gross, A. Ishii, K. Hirata, T. Hatano, V. P. Koshelets, D. Koelle, R. Kleiner, W. W. Xu, H. B. Wang, and P. H. Wu, "THz emitters and detectors both fabricated from high Tc superconductors: Towards an integrated receiver", Applied Superconductivity Conference 2014, USA, Aug. 10-15, 2014.
- (8). Min Ji, Xianjing Zhou, Pei Wang, Ya Huang, Jie Yuan, Deyue An, Boris Gross, Akira Ishii, J. Shimizu, Takeshi Hatano, Dieter Koelle, Reinhold Kleiner, Weiwei Xu, Peiheng Wu, Huabing Wang, "CW Terahertz Emission above 1 THz from High Tc superconductor", Applied Superconductivity Conference 2014, USA, Aug. 10-15, 2014. (invited poster)
- (9). B. Gross, J. Yuan, D. An, M. Li, N. Kinev, X. Zhou, Y. Huang, M. Ji, T. Hatano, R. Mints, P. Wu, V. P. Koshelets, H. Wang, D. Koelle, and R. Kleiner, Coherent terahertz emission from Bi2Sr2CaCu2O8 intrinsic Josephson junction stacks, Conference for Cryoelectronic Devices, October 06-08, 2013, Bad Herrenalb, Germany (2013).
- (10). B. Gross, F. Rudau, M. Li, D. An, N. Kinev, T. Hatano, R. Mints, P. Wu, V. P. Koshelets, D. Koelle, H. Wang, and R. Kleiner, Coherent terahertz emission from Bi2Sr2CaCu2O8 intrinsic Josephson junction stacks, Eighth international conference on vortex matter in nanostructured superconductors, Rhodes, Greece, September 21-26, 2013.
- (11). H. B. Wang, J. Yuan, D. Y. An, N. Kinev, M.Y. Li, X. J. Zhou, M. Ji, Y. Huang, T. Hatano, V. P. Koshelets, D. Koelle, R. Kleiner, W. W. Xu, and P. H. Wu, "Towards Practical Applications of THz Josephson Oscillators with Sub-mW Power and 500 GHz Frequency Tunability", The 38th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Mainz, Germany, September 1-6, 2013.
- (12). H. B. Wang, J. Yuan, D. Y. An, M. Y. Li, T. Hatano, W. W. Xu, P. H. Wu, B. Gross, D. Koelle, R. Kleiner, N. Kinev, and V. P. Koshelets, "Towards practical applications of widely-tunable THz sources made of high-Tc layered Bi2Sr2CaCu2O8+d superconductors", the 24th International Symposium on Space Terahertz Technology, ISSTT 2013, Groningen, April 8-10, 2013.

[図書] (計 1 件)

- (1). H. B. Wang, "Applied Superconductivity: Handbook on Devices and Applications", Chapter

11.1, Josephson Arrays as Radiation Sources  
-Paul Seidel (Editor) Wiley-VCH (2015)

[産業財産権]  
○出願状況 (計 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

王 華兵 (WANG HUABING)  
国立研究開発法人物質・材料研究機構  
機能性材料研究拠点・主席研究員  
研究者番号：70421427

### (2) 研究分担者

羽多野 毅 (Takeshi Hatano)  
国立研究開発法人物質・材料研究機構  
超伝導物性ユニット・グループリーダー  
研究者番号：50354337

### (3) 連携研究者

袁 潔 (Jie Yuan)  
国立研究開発法人物質・材料研究機構  
超伝導物性ユニット・NIMS 特別研究員  
研究者番号：70469790

石井 明 (Akira Ishii)  
国立研究開発法人物質・材料研究機構  
超伝導物性ユニット・主任研究員  
研究者番号：70354339