

機関番号：11501

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360151

研究課題名(和文) 高温超伝導体の磁束量子ダイナミクスとテラヘルツ波放射デバイス応用

研究課題名(英文) Fluxon Dynamics of High-TC superconductor and device application for THz wave.

研究代表者

中島 健介 (NAKAJIMA KENSUKE)

山形大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：70198084

研究成果の概要(和文)：

高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (Bi-2212)固有ジョセフソン接合は、大強度テラヘルツ波発振デバイスへの有望な候補である。本研究では、(1)固有ジョセフソン接合の磁束量子フロー特性に及ぼすアンテナ集積の効果、(2)磁束フローによる固有ジョセフソン接合におけるプラズマ共鳴モード励起現象を解明するとともに、(3)電流注入した固有ジョセフソン接合からのテラヘルツ・プラズマ共鳴放射を実証した。上記の成果に加えて、Bi-2212固有ジョセフソン接合の接合特性を左右するBi-2212単結晶のキャリア制御に関する広範な調査研究を行った。その結果、Bi-2212のCaサイトの一部をYで置換することにより $T_c$ 低下させることなく、キャリア濃度を制御できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (Bi-2212) High- $T_c$  superconductor intrinsic Josephson junction(IJJ) is a promising candidate of intense terahertz emitting device. At present, elucidation of the interaction between the traveling fluxons and electromagnetic wave in the junction (Josephson plasma modes) are key to succeed in the terahertz emissions. In this research, we have elucidated (1) Antenna integration effects on flux-flow properties of Bi-2212 IJJ, (2) Excitation phenomena of plasma resonance mode of Bi-2212 IJJ by flux-flow, and demonstrated (3) Terahertz plasma resonance emission from current-injected Bi-2212 IJJ. In addition to above mentioned results, we have comprehensively studied carrier control of Bi-2212 single crystal which dominates junction parameters of Bi-2212 IJJ. As the result, we have found that a partial substitution of Ca site by Y can controls carrier concentration with no degradation in  $T_c$ .

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2009年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2010年度	3,200,000	960,000	4,160,000
年度			
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：超伝導電子デバイス

科研費の分科・細目：電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：高温超伝導体，固有ジョセフソン接合，ボルテクス，テラヘルツ

## 1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ波帯の電磁波はマイクロ波・ミリ波といった電波の短波長側と遠赤外線といった光波の長波長側との間の広大で未開拓の周波数資源であり、情報通信の分野では、これを利用することで光有線ネットワークとワイヤレスの情報機器をシームレスに接続しハイビジョン映像を瞬時にやり取りするような高速大容量通信が可能になる。また、DNA などの生体関連物質がテラヘルツ波の帯域(周波数: 0.1 ~ 30THz, 波長: 3mm ~ 0.3mm) に物質固有の吸収スペクトル、いわゆる指紋スペクトルを持つことを利用する検出・分析技術や、テラヘルツ波が電波に近い物質透過性と光に近い直進性を利用した透過イメージング技術は、バイオテクノロジー、セキュリティ、医療といった情報通信以外の幅広い産業分野でのテラヘルツ波の応用や新規産業の創出につながると期待されている。

一方、この周波数領域に対応する技術の現状を、光源として用いられる各種半導体デバイスや光学装置の出力は、いずれも 1THz 近辺で出力が低下する傾向がみられる。このようにテラヘルツ波帯は、ギガヘルツ帯から高速・高周波化を進めてきた半導体電子デバイスと赤外線から低周波・長波長化を進めてきた光学装置双方の未開拓領域となっており、使いやすい光源と検出デバイスの開発が遅れている、いわゆる“テクノロジーギャップ”になっている。これを克服するテラヘルツ光源としてパラメトリック光発生装置(DFG, parametric)やナノスケールで制御された半導体多重量子井戸構造を利用する量子カスケードレーザー(QCL)の研究が進んでいるが、テラヘルツ波のより幅広い分野での応用を推進するには周波数可変でしかも連続波発振が可能な使い易いコヒーレントテラヘルツ光源の開発が喫緊の課題として残されている。

コヒーレントなテラヘルツ波を得る手段としてテラヘルツ帯の振動数を有するフォノンや固体プラズマの励起が有望視されている。前田らによって発見されたビスマス系銅酸化物超伝導体(以下、Bi-HTS)は、結晶中の二次元 CuO<sub>2</sub> 導電面が絶縁性の結晶面を挟んで積層した多重トンネル接合を形成しており、超伝導転移温度以下では、結晶全体が CuO<sub>2</sub> 面を超伝導電極とする固有ジョセフソン接合(Intrinsic Josephson junction: 以下 IJJ と略)として機能する。立木らは、IJJ におけるテラヘルツ・ジョセフソン・プラズマの存在を理論的に裏付け、Bi-HTS IJJ 内に磁束量子の運動によってテラヘルツ・プラズマ波を励振すれば、Bi-HTS IJJ の外へテラヘルツ電

磁波が放射されることを数値シミュレーションの結果から予見している。こういったなか、筑波大学と米国のアルゴンヌ国立研究所の研究グループは、電流注入によって IJJ からテラヘルツ波が放射されることを報告し注目されている。この場合、接合をキャビティとするジョセフソン・プラズマ共鳴がテラヘルツ放射を引き起こしたと考えられるが、プラズマの励振メカニズムは十分に解明されておらず放射強度も弱く実用的なレベルには到達していない。

## 2. 研究の目的

本研究では、より強いテラヘルツ波放射を目指し、Bi-HTS IJJ 中を磁束量子を伴って運動するジョセフソン・ボルクスと接合中を伝播する電磁波との相互作用を利用したジョセフソン・プラズマ励起の可能性を検証するとともに、プラズマ励起状態にある Bi-HTS IJJ から効率よくテラヘルツ電磁波を放射させるためのインピーダンス整合とアンテナの集積化の効果を検討した。

また、本研究に先立ってテラヘルツ波放射が報告されている Bi-HTS IJJ への電流注入によるテラヘルツ・プラズマ共鳴放射を検証するとともに、デバイス化の基盤となる高品質 Bi-HTS 単結晶の育成と接合特性(臨界電流密度、 $J_C$ 、接合抵抗、 $R_N$ )を支配するキャリア濃度の制御法に関する検討を行った。

## 3. 研究の方法

### (1) デバイスの構造と作製

立木らにより理論的にテラヘルツ波放射の可能性が示唆されている図 1 のような構造のデバイス動作を確認するために、本研究では、人工的に表面段差を形成した酸化物単結晶基板上に Capped-LPE 法により成膜した Bi-HTS 結晶膜を図 2 のように微細加工してジョセフソン・プラズマを励振する **Bi-HTS IJJ 励振器(Exciter)と共振型アンテナ(Resonator)** を集積化したアンテナ集積型 Bi-HTS IJJ デバイスを作製した。Bi-HTS IJJ とアンテナの微細加工は、紫外線レジスト露光と Ar イオンエッチングによるフォトリソグラフィと収束イオンビーム加工装置(FIB)により行った。

### (2) 測定

超伝導転移温度、 $T_C$

材料となる Bi-HTS Capped-LPE 膜と作製したデバイスの  $T_C$  は、ガス冷却型無冷媒冷凍機クライオスタット(最低到達温度 4.2K)を用いて測定した。

磁束量子ダイナミクス  
 作製したアンテナ集積型 Bi-HTS IJJ デバイスをパルス管冷凍機(最低到達温度 30K)に搭載して 0~1.1 T の磁場中で Bi-HTS IJJ の電圧 - 電流特性を 4 端子法により測定して、磁束ダイナミクスを評価した。

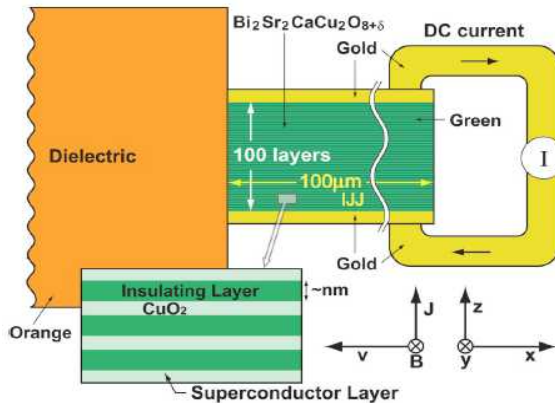


図1 Bi-HTS IJJ のジョセフソン・プラズマ励起を利用するテラヘルツ光源の概念図  
 M.Tachiki et. al., Phys. Rev. B, **71**, 134515(2005).

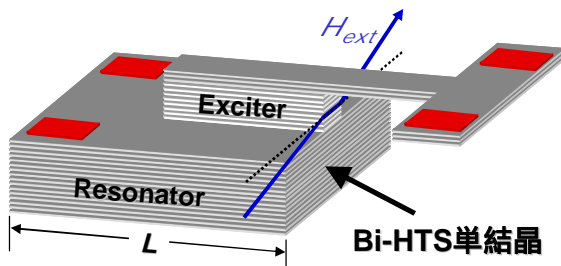


図2 本研究で提案した共振型アンテナ(Resonator)に段差型Bi-HTS IJJ励振器(Exciter)を集積したアンテナ集積型Bi-HTS IJJテラヘルツ光源

#### 4. 研究成果

##### (1) 磁束量子フローによる Bi-HTS IJJ のジョセフソン・プラズマ共鳴励起の解明

図3に示す構造の段差型 Bi-HTS IJJ を表1のような異なる接合サイズ( $L, W, D$ )で作製し、それぞれが磁場中で示す電圧 - 電流特性から磁束量子フローダイナミクスを詳細に検討し、磁束量子フロー速度を評価した。図4にサンプル 01BY4S-40 で測定された電圧 - 電流特性を一例として示す。

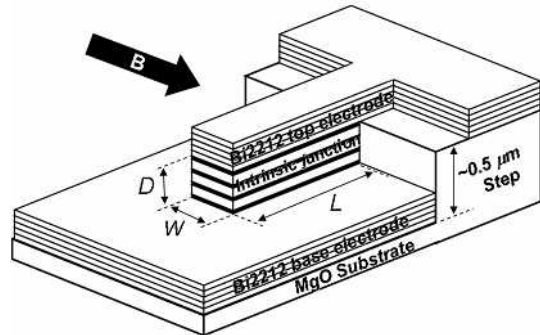


図3 Bi-HTS IJJ の構造  
 矢印 B は、磁束量子を導入するために印加した外部磁場を表す

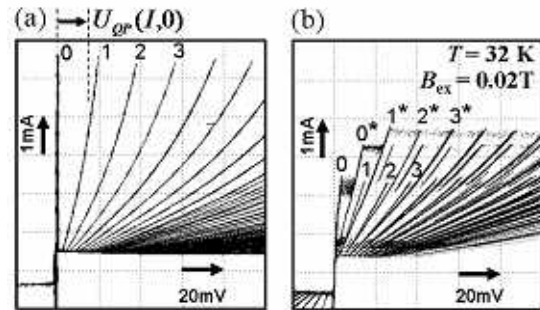


図4 Bi-HTS IJJ (01BY4S-40) の電圧 - 電流特性  
 (a) ゼロ磁場 (b) 印加磁場  $B_{ex} = 0.02$  T.

表1 接合サイズと接合特性パラメータ

接合	01BY4S-40	90BY0S-50	90BY0S-80	90BY0S-100
$L$ ( m )	40	50	80	100
$W$ ( m )	20	20	20	20
$D$ ( nm )	120	230	230	180
$N$	80	150	150	120
$I_c$ ( mA )	5	3.5	8.5	10
$J_c$ ( A/cm <sup>2</sup> )	625	350	530	500
$c_1$ ( m/s )	$9.8 \times 10^6$	$1.8 \times 10^7$	$1.8 \times 10^7$	$1.5 \times 10^7$
$v_{FF}$ ( m/s )	$5.8 \times 10^5$	$7.0 \times 10^5$	$5.1 \times 10^5$	$4.5 \times 10^5$
	$c_{17}$	$c_{20}$	$c_{37}$	$c_{33}$

その結果、図5に示すように磁束量子フロー速度が、印加磁場の低下とともに増大し、外部磁場の値が1接合あたりの磁束が1磁束量子に一致したときに、接合内のプラズマ・モード速度のうち最高速の in-phase モード速度  $c_1$  に収斂することを明らかにした。これは、低温超伝導体トンネル型ジョセフソン接合において観測される接合をキャビティとする1次フィスケ共鳴ステップ高さの印加磁場依存性と同じ振る舞いであり、Bi-HTS IJJにおいて接合をキャビティとする  $c_1$  モードのプラズマ共鳴がフィスケ共鳴ステップのそれと同じ外部磁場条件 ( $\Phi_{ext} = \Phi_0$ ) 課において励起されることを強く示唆している。これにより、Bi-HTS IJJ を用いてテラヘルツ・プラズマを励振するための有用な知見が得られた。

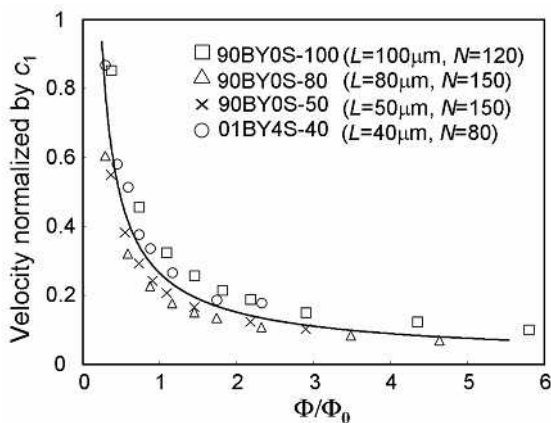


図5 異なるサイズのBi-HTS IJJにおいて測定された磁束量子フロー速度の印加磁場依存性(磁束量子フロー速度は、接合ごとに決まるin-phaseモード速度  $c_1$ 、引火磁場は、接合あたりの磁束量子数で規格化して表示)

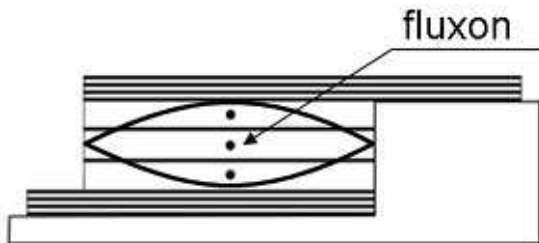


図6 Bi-HTS IJJに接合当り  $\Phi_0$  の外部磁場を印加したときの1次フィスケ共鳴状態

(2) Bi-HTS IJJ の磁束量子フロー状態に与えるアンテナ共振効果

磁束量子フローによってプラズマモードを励起したBi-HTS IJJから効率よく外部へ電磁波を放射するために図7に示す共振型アンテナを集積したBi-HTSデバイスを作製し、

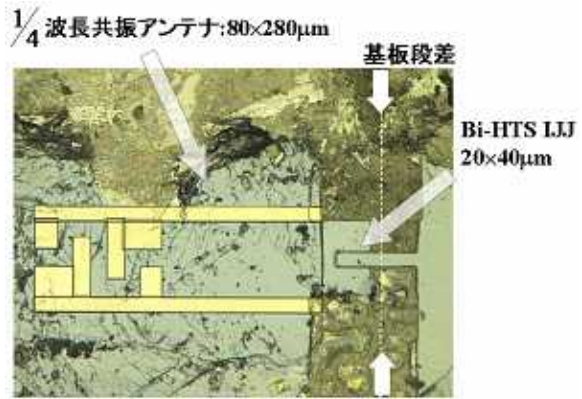


図7 1/4 波長共振アンテナを集積した Bi-HTS IJJ デバイス

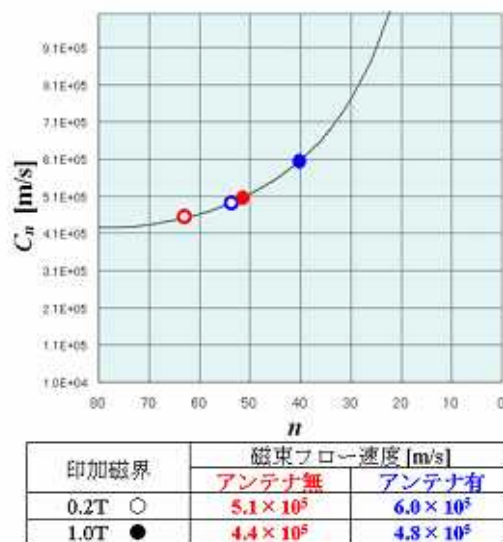


図8 1/4 波長共振アンテナの集積前後での励起プラズマモード次数  $n$  の変化(実線は、理論的に求められる Bi-HTS IJJ 中のプラズマモード速度とモード次数の関係)

アンテナ共振が磁束量子フロー状態に与える影響を調査した。

図7のデバイスは中央に位置する長さ280  $\mu$ m、幅80  $\mu$ mのHTS薄膜ストリップが280  $\mu$ mを1/4波長として約0.2THzに共振するアンテナになっている。段差型Bi-HTS IJJは、アンテナの給電点となるストリップの右端に接続されている。また、ストリップ左端のミアンダーパターンは、高周波チョークの役割を果たすとともに接合へ直流バイアス電流を供給する。フォトリソグラフィーによってBi-HTS IJJを作製して測定を行ってから再びFIBによってこのアンテナ構造を追加集積加工して再測定することで、アンテナ集積の効果を判定した。測定は、Bi-HTS IJJに図3と同様に外部磁場を印加しながら接合電流を流すことで発生する磁束量子フロー

電圧を測定し、その値から接合内に励起したプラズマモードの次数を決定した。図8に、アンテナの有無によるモード次数の変化を理論と比較して示す。モード次数の低下は磁束量子の in-phase の度合いの向上を意味することから、Bi-HTS IJJ に集積したアンテナが磁束量子の斉一性向上に寄与することがわかる。このメカニズムの解明には至らなかったが、アンテナ共振電流によって接合端の高周波交番磁場として磁束量子の斉一運動に寄与した結果と考えられ、共振型アンテナが高周波放射の効率化に寄与することが示唆される。

### (3) Bi-HTS のキャリア濃度制御

Bi-HTS IJJ の接合特性は、Bi-HTS のキャリア状態によってほぼ支配される。従来、キャリア制御は過剰酸素量によって制御する方法が一般的だったが、接合臨界電流を抑制し接合抵抗を大きくするためには過剰酸素を大幅に減らす必要があり、それに伴って超伝導転移温度  $T_c$  が低下してしまうという問題があった。本研究では、Bi-HTS の  $\text{Ca}^{2+}$  サイトの一部 (x) を  $\text{Y}^{3+}$  で置換した  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{1-x}\text{Y}_x\text{Cu}_2\text{O}_8$  を作製して、Y ドープによるキャリア濃度制御が  $T_c$  と、接合特性に与える影響を調査した。

その結果、図9に示すようにYをドープしたBi-HTSは、アニールによりキャリア濃度を大きく低下させても  $T_c$  が低下しないことを明らかにした。また、図10に示すように、YドープによってBi-HTS IJJの臨界電流が制御できることを確認した。この成果は、Bi-HTS IJJをデバイス応用する上で極めて有用な知見である。

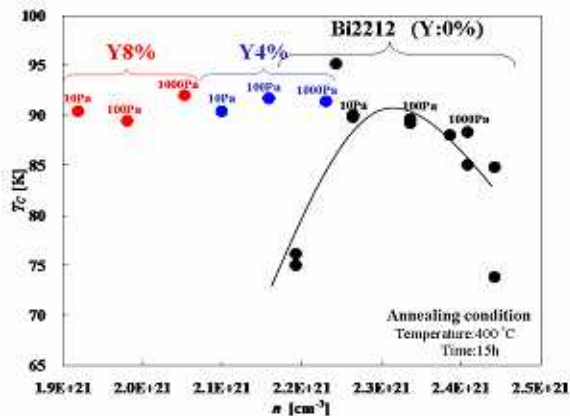
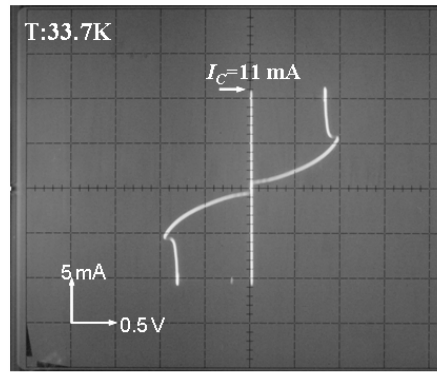


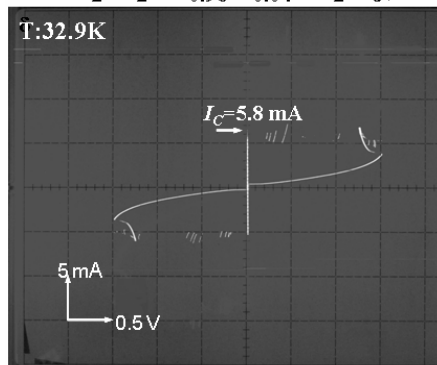
図9 Y置換Bi-HTSのキャリア濃度と超伝導転移温度の関係

### (a) $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$



接合サイズ  $20 \times 50 \mu\text{m}$  接合数 50

### (b) $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{0.96}\text{Y}_{0.04}\text{Cu}_2\text{O}_{8+}$



接合サイズ  $20 \times 40 \mu\text{m}$  接合数 80

図10 Yドープによる接合臨界電流  $I_c$  の制御例 (a) Y 0% Bi-HTS IJJ, (b) Y 4% Bi-HTS IJJ

アニール条件：素分圧  $\text{PO}_2=10 \text{ Pa}$ , アニール温度  $T_a=400 \text{ }^\circ\text{C}$ , アニール時間  $t_a=15 \text{ h}$

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計19件、内査読有13件)

- (1) K. Nakajima, M. Isobe, T. Chiba, H. Yamada, Cavity Resonance Effects on Phase-Locking of the Flux-Flow in Bi-2212 Intrinsic Josephson Junctions, IEEE Trans. Appl. Supercond. (2011), in press.
- (2) Y. Endo, S. Ono, M. Uno, T. Saito, A. Saito, K. Nakajima, and S. Ohshima, Improvement in Power-Handling Capability of Superconducting Filters Using Multi-Layered Microstrip Line Resonators, IEEE Trans. Appl. Supercond. (2011), in press.
- (3) K. Nakagawa, T. Honma, K. Takeda, S. Ono, H. Kai, A. Saito, M. Mukaida, K. Nakajima, and S. Ohshima, Intrinsic Surface Resistance of YBCO Thin, Films under DC Magnetic Field, IEEE Trans. Appl. Supercond. (2011), in press.

- (4) T. Saito, S. Ono, M. Uno, Y. Endo, A. Saito, K. Nakajima, and S. Ohshima, Development of Trimming Technique for Superconducting Tunable Filters, IEEE Trans. Appl. Supercond. (2011), in press.
- (5) H. B. Wang, S. Guénon, B. Gross, J. Yuan, Z. G. Jiang, Y. Y. Zhong, M. Grünzweig, A. Iishi, P. H. Wu, T. Hatano, D. Koelle, and R. Kleiner, "Coherent Terahertz Emission of Intrinsic Josephson Junction Stacks in the Hot Spot Regime", Phys. Rev. Lett. 105, 057002 (2010).
- (6) T. Kasai, S. Yamashita, H. Nakajima, T. Fujii, I. Terasaki, T. Watanabe, H. Shibata, A. Matsuda, STM/STS study of electronic states in highly underdoped Bi2212, Physica C vol. 470, p. S173-S175, (2010).
- (7) S. Yamashita, T. Kasai, T. Fujii, T. Watanabe, A. Matsuda, Control of carrier concentration in Bi-2212, Physica C vol. 470, p. S170-S172, (2010).
- (8) H. B. Wang, S. Guénon, J. Yuan, A. Iishi, S. Arisawa, T. Hatano, T. Yamashita, D. Koelle, and R. Kleiner, "Hot spots and waves in Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub> intrinsic Josephson junction stacks - a study by Low Temperature Scanning Laser Microscopy", Phys. Rev. Lett. 102, 017006 (2009).
- (9) M. Suzuki, T. Hamatani, Y. Yamada, K. Anagawa, T. Watanabe, Significantly doping-dependent Josephson critical current --inhomogeneity in real space or heterogeneity in k-space, J. Phys.: Conf. Ser. Vol. 150 no. 5, p. 52252, (2009).
- (10) Y. Yamada, Ken. Nakajima, Koji Nakajima, "RF impedance of intrinsic Josephson junction in flux-flow state with a periodic pinning potential and its optimum condition for RF radiation", Physica C. vol.469, pp.1088-1092, (2009).
- (11) L. Ozyuzer, Y. Simsek, H. Koseoglu, F. Turkoglu, C. Kurter, U. Welp, A. E. Koshelev, K. E. Gray, W. K. Kwok, T. Yamamoto, K. Kadowaki, Y. Koval, H. B. Wang and P Mueller, "Terahertz wave emission from intrinsic Josephson junctions in high-Tc superconductors", Supercond. Sci. Technol. 22, 114009 (2009).
- (12) Kensuke Nakajima, Yasuyuki Yamada, Tsutomu Yamashita, "RF responses and possible applications of intrinsic Josephson junctions in different vortex states", Physica C, Vol.468, pp.660-663, (2008).
- (13) Y. Yamada, Ken. Nakajima, Koji Nakajima, "RF impedance of intrinsic Josephson junction in flux-flow state with a periodic

pinning potential", Physica C, Vol.468, pp.1295-1297, (2008).

〔学会発表〕(計4件)

- (1) Kensuke Nakajima, Masahiro Isobe, Takashi Chiba, Hironobu Yamada, "Novel features of vortex motion in Bi-2212 intrinsic Josephson junctions effected by resonance effects", International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM2010), 26 Apr., 2010 Antalya, Turkey.(招待講演)
- (2) Kensuke Nakajima, Masahiro Isobe, Takashi Chiba, Hironobu Yamada, "Internal and external resonance effects on the flux-flow properties of Bi-2212 intrinsic Josephson junctions", The 7th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and Plasma Oscillations in High-T<sub>C</sub> Superconductors (PLASMA 2010), 1 May, 2010, Hirosaki, Japan. (招待講演)
- (3) Kensuke Nakajima, Takashi Chiba, Hironobu Yamada, "External and Internal Resonance Effects on Bi-2212 intrinsic Josephson junctions in Flux-Flow State", East Asia Symposium on Superconductor Electronics (EASSE2009), 14 Oct., 2009, Nanjing, China. (招待講演)
- (4) Kensuke Nakajima, "Response of Collective Plasma Modes in Intrinsic Josephson Junctions to Electromagnetic Stimulation", The 6th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and Plasma Oscillations in High-TC Superconductors (PLASMA 2008), 19 Jul., Pohang, Korea,2008(招待講演)

6. 研究組織

- (1)研究代表者  
 中島 健介 (NAKAJIMA KENSUKE)  
 山形大学・大学院理工学研究科・教授  
 研究者番号：70198084

- (2)研究分担者  
 王 華兵 (WANG HUA-BING)  
 (独)物質・材料研究機構・研究員  
 研究者番号：70421427

渡辺 孝夫 (WATANABE TAKAO)  
 弘前大学・大学院理工学研究科・教授  
 研究者番号：40431431