

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560497

研究課題名(和文)低雑音・高温動作を実現する高温超伝導カイネティックインダクタンス検出器の開発

研究課題名(英文) Study of high Tc kinetic inductance detectors with low noise and high temperature operation

研究代表者

島影 尚 (Shimakage, Hisashi)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：80359091

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：カイネティックインダクタンス検出器(KID)を高温超伝導体を用いて実現するための基礎的検討を行った。KID素子の作製を目標に、高周波で低損失性を持つサファイア基板上へ、Bi-2212の高温超伝導膜の成膜をPLD法とMOD法を用いて行った。Bi-2212薄膜成膜にはCeOバッファ層が有効であることがわかった。臨界温度は65Kを示し、その薄膜の臨界電流密度、高周波表面抵抗評価を行った。実際のKID素子作製に向けて、カイネティックインダクタンスのシミュレーション評価を行った。また、補助的検討としてNbNのパラメータを用いた最適なKID作製の検討を行い、実際にNbNのKID素子の光応答を確認した。

研究成果の概要(英文)：We studied a fundamental research in order to realize kinetic inductance detectors (KIDs) using high-temperature superconductors. For the goal of the production of KID element, the Bi-2212 superconducting thin films were prepared by the PLD and the MOD methods on sapphire substrates with low loss properties at high frequency. We found that CeO buffer layers were effective for Bi-2212 thin film deposition. The thin films showed the critical temperature of 65K, and were evaluated using both of critical current density and high-frequency surface resistance. In order to produce the KID detectors, evaluations from simulations of the kinetic inductance were implemented. Furthermore, we studied the design of KID components, and the responses of light irradiation were confirmed using the NbN KID detectors as supplementary study.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：高温超伝導 KID

1. 研究開始当初の背景

超伝導デバイスは高速性、高感度性、低消費電力性などの特徴を持ち、微少磁場検出器、電磁波検出器、光検出器などの様々な素子への実用化に向けて研究が続けられている。特に Nb 系超伝導材料 (応答上限周波数: 700GHz、臨界温度: 9K) を用いての、SIS (超伝導-絶縁体-超伝導) 型トンネル素子は、他の検出器を凌駕する低ノイズ特性を有し、世界中の天文台における電波天文観測において、すでに 20 年以上の実用観測の実績を有する。また、より高周波応答が可能な次世代の SIS 検出器としては、NbN や MgB₂ の超伝導材料が次世代の SIS 接合として研究が続けられている。

超伝導現象を利用した新しい検出器として、2002 年に、欧州のグループが、カイネティックインダクタンス検出器 (KID) を提案した。KID は、超伝導体に本質的に存在するカイネティックインダクタンス成分が入射電磁波により変調されることを利用した検出器である。RLC 直列の共振回路が超伝導で構成されており、伝送線路にインダクティブに結合されている。伝送線路に入力するマイクロ波を共振回路の共振周波数付近で周波数掃引すると、その透過出力は共振回路の共振周波数で鋭いディップを示す。外部からの入射電磁波エネルギーが超伝導のカイネティックインダクタンスを変化させ、その結果共振周波数が変化する。共振周波数の変化から入射電磁波パワーを見積もるのが検出の基本原則となる。KID のノイズ等価パワー (NEP) は

$$NEP = 2\Delta(N_{eq}/\tau_{qp})^{1/2}$$

で表わされる。ここで、 N_{eq} は準粒子密度、 τ_{qp} は準粒子ライフタイムである。見積もりによると NEP は $10^{-20} \text{W/Hz}^{1/2}$ 以下も可能と予想されており、既存の直接検波検出器に比べると、数桁のノイズ低減が実現できる。そのことから、KID は天文学における重要な検出器となる可能性が大きいと認知され始めており、欧州の研究機関が中心となり研究が進められている。国内では、最近になって、国立天文台と理化学研究所が、電波天文用検出器として研究に取り組み始めたところである。

現在の KID 研究は天文観測での検出器としての研究が主であり、Ta や Al などの低温超伝導体を用いて行われている。電波天文などの特殊な研究分野では、高性能性が何よりも優先される。そのことから、希釈冷凍器などを用いて極低温環境での実験を行い、熱雑音を抑えて、極低雑音性を狙っている。しかしながら、希釈冷凍器などの低温環境を得るためには、特殊な装置を必要とすることから、汎用的な使用では煩雑さが大きい。

2. 研究の目的

本研究課題では、汎用的に使用できる高温動作 KID 検出器の実現を目指して、BSCCO

高温超伝導体を用いての KID 作製の基礎的研究を行った。KID は本質的に単層薄膜で作製されるということも、積層構造の作製が困難な高温超伝導体において素子作製上のメリットが高い。また、KID はその他の直接検波の検出器と比べると、本質的に周波数の多重化が容易という特徴を持つため、イメージングなどに使われるアレー化などへの対応も容易となっている。

本研究において、この 3 年間の研究期間で、BSCCO 高温超伝導体による KID 素子実現の基礎固めを行う事を目指した。最終年度までに具体的な素子構造設計を行い、そのプロトタイプの作製を目指した。

3. 研究の方法

KID 素子作製に向けて、最初に高品質の BSCCO 薄膜の成膜法の確立を行う。YAG レーザーを用いてレーザーアブレーション法による BSCCO 薄膜作製を行う。また、有機金属堆積 (MOD) 法による BSCCO 薄膜作製も同時に進める。MOD 法は、比較的容易に、大面積の薄膜を得ることができる成膜法で、BSCCO 薄膜作製に関しては、国内で研究が進められているものである。一般には、BSCCO 薄膜成膜基板としては誘電率の高い SrTiO₃ 基板が高温超伝導薄膜に対して作製されているが、本研究課題では高周波応用が基本となるので、高周波ロスの少ないサファイア基板上への BSCCO 薄膜成膜を行う。そのために、CeO₂ などのパフア層の成膜などにより、高品質化を図る。それぞれの成膜法に対して、最適な成膜条件を模索し、KID 用薄膜としてより最適な成膜方法を選択する。また、サファイア共振器法により、10GHz 帯において、作製された薄膜の高周波表面抵抗測定を行い、KID 素子として重要なパラメータである高周波ロスの評価も行う。

KID 素子としての動作に関して、デバイス構造に従ってカイネティックインダクタンスがどのように変調されるかのシミュレーションにより確認する。また、超伝導ギャップや準粒子ライフタイムの見積もりのため、BSCCO 薄膜のイントリンシック接合の作製を始める。また、実際の KID 素子の作製のための基礎検討も行う。

4. 研究成果

(1) BSCCO 薄膜の成膜法の確立

高品質の BSCCO 薄膜の作製法を確立する目的で、レーザーアブレーションによる方法と MOD 法による方法を試みた。

レーザーアブレーションによる方法

レーザーアブレーション法は、パルス紫外線レーザーを薄膜原料ターゲットに集光させ、光化学反応に伴う爆発的気化により励起化学種を対向する基板上に薄膜化させる方法である。本実験では波長 266nm、光パワー 90mJ の Nd-YAG レーザーを用いる。チャンバー内の酸素ガス圧や、基板温度などの様々

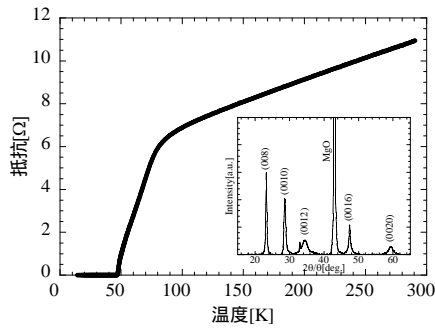


図 1 レーザーアブレーション法により作製した BSCCO 薄膜の抵抗-温度特性と XRD

な成膜条件を変化させて成膜を行った。作製された BSCCO 薄膜の XRD 測定の結果と、抵抗-温度特性を図 1 に示す。c 軸方向に配向する薄膜が得られた。臨界温度はオンセットで 80K、オフセットで 46K であった。表面モフォロジーは原子層レベルでフラットであり、素子作製に期待が持てるものと当初は予想して研究を行った。しかし、薄膜作製の安定性が非常に悪く、同じ条件で薄膜を作製しても、再現性が非常に悪かった。様々な実験の結果、ターゲット材料にレーザー照射されると、ターゲット自身の状態が変化してしまうことがわかった。それを解決する目的で、毎成膜前に、ターゲット自身が以前の成膜のときから影響がないほど表面を削ったところ、再現性を上げることができた。ただし、ターゲット自身の寿命も短くなり、大量の薄膜作製は困難であることがわかった。検討の結果、高い臨界温度を持つ薄膜を再現性よく大量に成膜する状況にするには、より長期間の検討が必要と判断し、本研究期間で、レーザーアブレーション法による成膜法の確立は困難と結論づけた。ただし、将来的には、可能性が高い方法と思われるので、本研究期間以降も研究を続ける予定である。

有機金属分解 (MOD) 法による方法

MOD 法は大掛かりな真空装置必要とせず、低コストで大面積な薄膜の作製が可能であるなどの特徴を有している。そのため超伝導線材の分野で数多くの研究が行われている。本研究で MOD 法により、KID 素子として応用可能な薄膜が得られるかどうか、成膜条件の精査を行った。特に、高周波素子として使用可能な薄膜を作製するために、低損失のサファイア基板に Bi-2212 薄膜の作製を行った。研究はじめに、Bi-2212 とサファイア基板との格子ミスマッチングと、それらの反応性の問題から、膜の向上は困難であったが、CeO バッファ層を導入したことにより、臨界温度 65K まで改善された。図 2 に MOD 法により作製された Bi-2212 薄膜の抵抗-温度特性と、X 線による Φ スキャンの測定結果を示す。サファイア基板に、結晶構造がそろっ

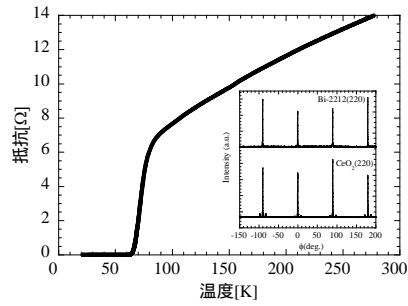


図 2 MOD 法により作製した BSCCO 薄膜の抵抗-温度特性と スキャン特性

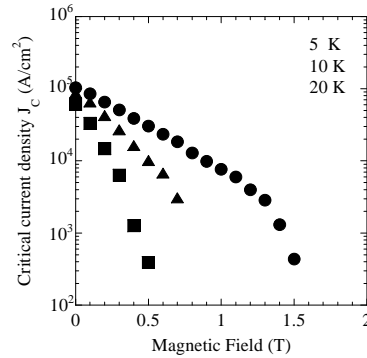


図 3 MOD 法により作製した BSCCO 薄膜の臨界電流密度-磁場依存性

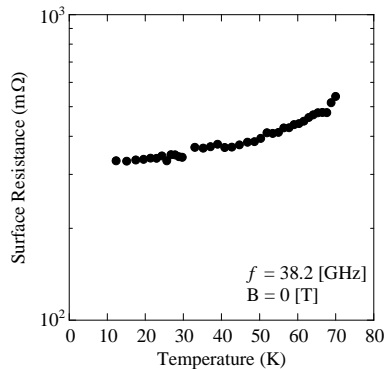


図 4 MOD 法により作製した BSCCO 薄膜の高周波抵抗-温度特性

て成長しており、バッファ層の効果が確認できる。また、図 3 に作製された薄膜の臨界電流-磁場特性、図 4 に 38.2GHz における表面抵抗の測定結果を示す。表面抵抗に関しては、温度が低下すると、 R_s が下がり、50 K 以下ではほとんど一定となる高温超伝導体特有の挙動を示した。得られた値は、常温の金属体(Cu 膜)とほぼ同程度であった。STO 基板に作製した Bi-2212 薄膜で同様の測定を行ったところ、CeO バッファ層上の Bi-2212 薄膜に比べて一桁以上低い抵抗値が得られていることから、さらなる条件の精査で、より低い抵抗値の薄膜が期待できる。また、CeO 薄膜をバッファ層として MOD 法により作製

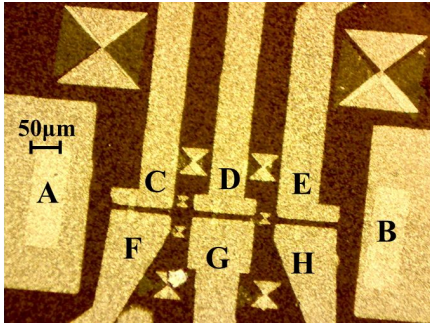


図 5 MOD 法により作製された Bi-2212 薄膜による接合の顕微鏡写真

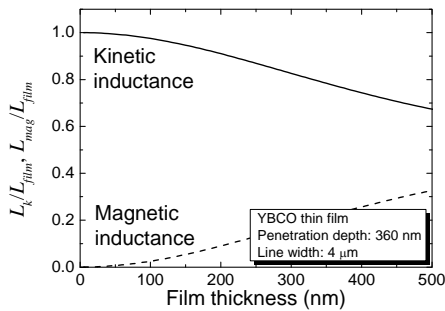


図 6 カイネティックインダクタンス-膜厚特性

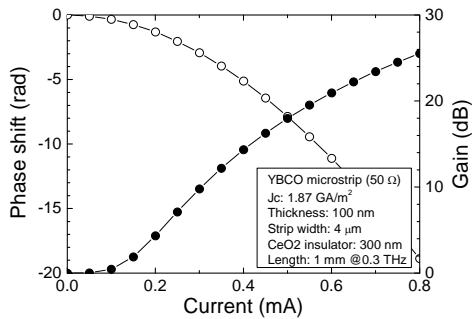


図 7 カイネティックインダクタンスによる位相変化

した薄膜を用いて、イントリンシック接合の作製を行った。図 5 にその素子写真を示す。素子作製プロセスは完成し、その電流電圧特性を評価したところ、非線形性の特徴は得られたが、明瞭なギャップ構造の測定には至っていない。今後の薄膜の高品質化で、ギャップ電圧などの評価に結びつけていく。

(2) カイネティックインダクタンスのシミュレーション

KID 素子としてのカイネティックインダクタンス成分を評価する方法を確立するために、最初に、パラメータがわかっている YBCO 薄膜に関して、カイネティックインダクタンス成分がどのような挙動を示すのかをシミュレーションにより導出した。磁場侵

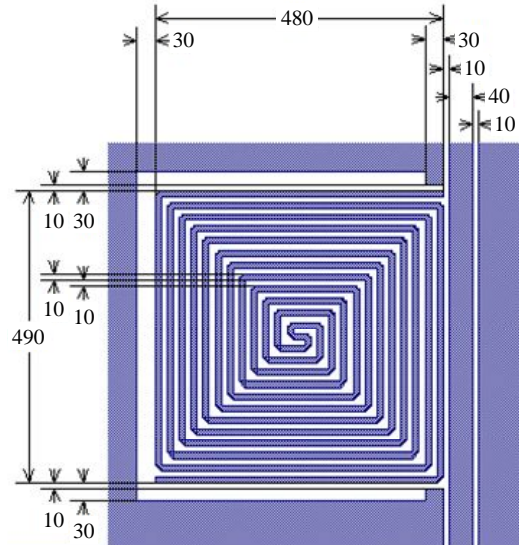


図 8 スパイラル型共振器の構成

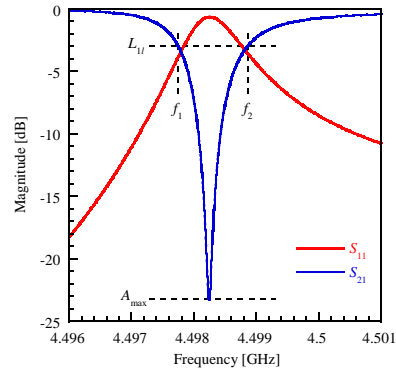


図 9 スパイラル型共振器の周波数特性

入長を 360nm と設定した時のカイネティックインダクタンスの膜厚依存性を図 6 に示す。カイネティックインダクタンスは膜厚が小さいほど大きくはなるが、100nm 程度の膜厚で飽和しており、現在の MOD による薄膜と同程度の厚さで大きなカイネティック成分が得られることがわかった。また、YBCO 薄膜による 50Ω のマイクロストリップを構成し、300GHz の電磁波を伝送させた時のカイネティックインダクタンスによる位相シフトのシミュレーション結果を図 7 に示す。バイアス電流により、位相のシフトが大きくなり、シミュレーション結果の妥当性を示している。

(3) KID 素子の設計

KID の設計法に関して、まずは NbN のパラメータを考慮に入れての最適な KID 作製の検討を行った。

スパイラル型 KID の設計

共振器型の構造として、スパイラル型にすることにより、長い伝送線路をコンパクトに配置することができる。設計に使用したスパイラル型共振器の構造と寸法を図 8 に示す。この共振器は半波長共振器の中心を軸として回転させた Rewound スパイラル構造であ

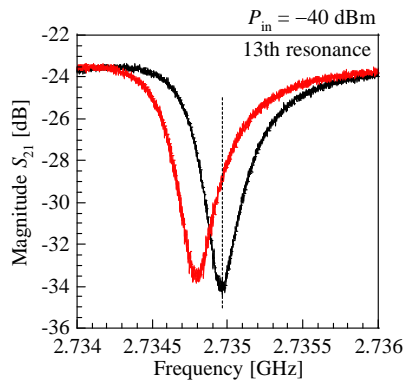


図 10 KID 素子の LED 光応答特性

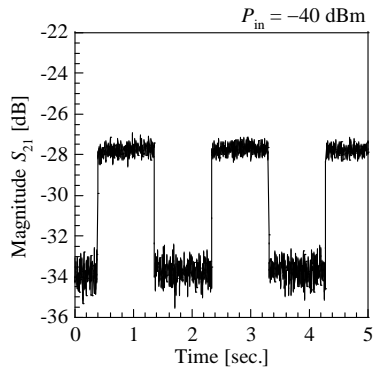


図 11 光の強度を ON-OFF した時の出力

る。スパイラル型共振器の線路幅及びスロット幅を共に $10\mu\text{m}$ とした。導波路の特性インピーダンスが $50\ \Omega$ となるようにコプレーナ導波路の線路幅を $40\ \mu\text{m}$ 、スロット幅を $10\ \mu\text{m}$ とした。図 9 に Sonnet em を用いて計算したスパイラル型共振器の周波数特性を示す。この結果より通過特性(S_{21})において中心周波数(f_0)を $4.498\ \text{GHz}$ とする共振が確認され、その最大減衰量(A_{max})は $23.27\ \text{dB}$ であった。

スパイラル型 KID の光応答特性

実際の KID 動作をシミュレーションする目的で、NbN によりスパイラル KID を作製し、LED 光を用いた光応答特性を測定し、応答時間の調査を行った。チップ全体に LED 光を照射し、中心素子の特性に着目して測定した。図 10 と図 11 に KID の LED 光応答特性を強度検出した結果を示している。図 10 は強度の周波数特性であり、黒が照射前、赤線が照射時の S_{21} 特性を示している。光を照射することにより、共振特性が低周波側へシフトしていることがわかる。また、図 11 は、中心周波数での S_{21} の値を時系列で観測し、光の照射を ON - OFF した場合の結果を示している。この結果は、光照射の有無によって S_{21} の値が 2 値を示し、高い時に光照射があり、低い値では光照射がないことに対応した光応答があることを示している。

本研究課題で、高品質の Bi-2212 薄膜の作製及び、カイネティックインダクタンスのシミュレーション、また、NbN 薄膜による、KID の光応答の実験を行った。Bi-2212 薄膜についてはバッファ層の効果により、高品質

化が図れることを示すことができた。一方で、本研究期間中では、Bi-2212 による KID 作製までには至っていないが、シミュレーションなどの研究を行うことにより、今後の Bi-2212 薄膜による KID 素子作製の準備は整った。また、本研究遂行の過程において、超伝導カイネティックインダクタンスを用いた増幅器の検討も始めることができ、今後の研究の広がりの足がかりも作ることができた。今後は、この研究課題を継続して続け、実際の素子の作製および特性の評価までを行う予定である。

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 5 件)

S. Suzuki, H. Shimakage, A. Kawakami, A. Saito, and M. Takeda, 『Annealing Conditions of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}/\text{CeO}_2/r$ -plane Sapphire by MOD Method』、Physics Procedia、4 5 巻、181、2013、査読有。

S. Ariyoshi, K. Nakajima, A. Saito, T. Taino, H. Tanoue, K. Koga, N. Furukawa, H. Yamada, S. Ohshima, C. Otani, J. Bae, 『NbN-Based Microwave Kinetic Inductance Detector with a Rewound Spiral Resonator for Broadband Terahertz Detection』、Physics Express、6 巻、064103、2013、査読有。

S. Suzuki, H. Shimakage, A. Kawakami, A. Saito, and M. Takeda, 『Characteristics of MOD Bi-2212 Thin Films on r-Cut Sapphire With CeO_2 Buffer Layer』、IEEE Trans. Appl. Supercond.、2 3 巻、7501404、2013、査読有。

H. Shimakage, Z. Wang, 『Fabrication of Superconducting Nanowires Using MgB_2 Thin Films』、IEEE Trans. Appl. Supercond.、2 3 巻、2200104、2013、査読有。

K. Hayashi, A. Saito, T. Sawada, Y. Ogawa, K. Nakajima, H. Yamada, S. Ariyoshi, S. Ohshima, 『Microwave characteristics of microwave kinetic inductance detectors using rewound spiral resonators array』、Physics Procedia、4 5 巻、213、2013、査読有。

〔学会発表〕(計 22 件)

岩本恵祐、島影尚、川上彰、齊藤敦、武田正典、『高品質 Bi-2212 薄膜作製を目指した CeO_2 バッファ層製膜条件の最適化』、第 61 回応用物理学会春季学術講演会、2014.3.19、神奈川工科大学 堀川隼世、川上彰、兵頭政春、田中秀吉、

武田正典、島影尚、『ナノスロットアンテナを用いた超伝導中赤外光検出器の検討』、第 61 回応用物理学会春季学術講演会、2014.3.18、神奈川工科大学
日澤光紘、坪内恒祐、島影尚、『高温超伝導体固有ジョセフソン接合の特性評価』、第 21 回電気学会東京支部茨城支所研究発表会、2013.11.24、日上市
田村幸英、島影尚、『リアプノフ指数によるジョセフソン接合のカオス解析』、第 21 回電気学会東京支部茨城支所研究発表会、2013.11.24、日上市
岩本恵祐、鈴木渉太、島影尚、川上彰、齋藤敦、武田正典、『MOD 法による Bi-2212 薄膜作製におけるパツファ層製膜条件』、第 21 回電気学会東京支部茨城支所研究発表会、2013.11.24、日上市
武田正典、小嶋崇文、齋藤敦、島影尚、廣本宣久、『テラヘルツ帯超伝導パラメトリック増幅器実現に向けての材料検討』、第 23 回日本赤外線学会研究発表会、2013.11.24、防衛大学校
K. Iwamoto, S. Suzuki, H. Shimakage, A. Kawakami, A. Saito, M. Takeda, 『Evaluation of CeO₂-buffer-layer's deposition conditions for Bi-2212 thin films fabricated by MOD method』、International Superconductivity Symposium, 2013.11.20、東京都
M. Tamura, H. Shimakage, 『Lyapunov exponent analyses of chaotic oscillations in Josephson junctions』、International Superconductivity Symposium, 2013.11.20、東京都
堀川隼世、川上彰、兵頭政春、田中秀吉、武田正典、島影尚、『超伝導中赤外光検出器用スロットアンテナの評価』、第 74 回応用物理学会学術講演会、2013.9.18、同志社大学
岩本恵祐、島影尚、川上彰、齋藤敦、武田正典、『Bi-2212 薄膜の CeO₂ パツファ層成膜条件依存性』、第 74 回応用物理学会学術講演会、2013.9.18、同志社大学
田村幸英、島影尚、『ジョセフソン接合のカオス発生領域のシミュレーション』、第 74 回応用物理学会学術講演会、2013.9.18、同志社大学
J. Horikawa, A. Kawakami, M. Hyodo, S. Tanaka, and H. Shimakage, 『Evaluation of Nano Slot Antenna for Mid-Infrared Detectors』、The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, and The 18th OptoElectronics and Communications, 2013.7.3、東京都
堀川隼世、川上彰、兵頭政春、田中秀吉、島影尚、『中赤外光検出器スロットアンテナの検討』、第 60 回応用物理学会春季学術講演会、2013.3.29、神奈川工科大学

鈴木渉太、島影尚、川上彰、齋藤敦、武田正典、『有機金属分解法を用いた Bi-2212 薄膜の超伝導特性』、第 60 回応用物理学会春季学術講演会、2013.3.28、神奈川工科大学

S. Suzuki, H. Shimakage, A. Kawakami, A. Saito, M. Takeda, 『Annealing conditions of Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+x}/CeO₂/r-plane sapphire by MOD method』、International Superconductivity Symposium, 2012.12.5、東京都

鈴木渉太、島影尚、川上彰、齋藤敦、武田正典、『MOD 法により作製した Bi-2212 薄膜の超伝導特性評価』、第 20 回電気学会東京支部茨城支所研究発表会、2012.11.24、日上市

坪内恒祐、島影尚、『高温超伝導体単結晶に内在する固有ジョセフソン接合作製』、第 20 回電気学会東京支部茨城支所研究発表会、2012.11.24、日上市

田村幸英、島影尚、『RSJ モデルによるジョセフソン接合のカオス発生シミュレーション』、第 20 回電気学会東京支部茨城支所研究発表会、2012.11.24、日上市

S. Suzuki, H. Shimakage, A. Kawakami, A. Saito, M. Takeda, 『Characteristics of Bi-2212 thin films on r-cut sapphire with CeO₂ buffer layer by a MOD method』、Applied Superconductivity Conference, 2012.10.7、ポートランド(アメリカ)
H. Shimakage, Z. Wang, 『Fabrication of superconducting nanowires using MgB₂ thin films』、Applied Superconductivity Conference, 2012.10.7、ポートランド(アメリカ)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

島影 尚 (SHIMAKAGE HISASHI)
茨城大学・工学部・教授
研究者番号：80359091

(2) 研究分担者

齋藤 敦 (SAITO ATSUSHI)
山形大学・理工学研究科・准教授
研究者番号：70313567

武田 正典 (TAKEDA MASANORI)
静岡大学・創造科学技術大学院・講師
研究者番号：80470061

(3) 連携研究者

川上 彰 (KAWAKAMI AKIRA)
情報通信研究機構・未来 ICT 研究センター・主任研究員
研究者番号：90359092