

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：13904

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25286083

研究課題名(和文) サープ(CIRB)用超伝導レシーバーの研究開発

研究課題名(英文) Development of a superconducting receiver for the CIRB

研究代表者

有吉 誠一郎 (Ariyoshi, Seiichiro)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20391849

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：電波と光波の境界領域に位置するテラヘルツ波は、宇宙初期に形成した第一世代の星々からの赤方偏移した連続波放射の波長域である。本研究では宇宙赤外線背景放射(CIRB、サープ)の全天観測という新たな研究領域を切り拓くべく、高感度・広帯域・大規模アレイ性能を兼ね備えたテラヘルツ波検出器(レシーバー)を開発した。具体的には、従来の金属系超伝導材料に比べて高い転移温度をもつ窒化物系超伝導材料を導入することで、新たな力学インダクタンス検出器(MKID)アレイを開発し、同時読出し回路を構築して冷却から計測制御に至る全自動化を達成した。今後の大規模アレイ化により、イメージング性能のさらなる向上が期待される。

研究成果の概要(英文)：Terahertz waves, located in the gap between radio waves and visible light, have been recognized as a potential tool for the detection of the red-shifted continuum radiation from first stars in the early universe. We developed a terahertz-wave detector (receiver) with high sensitivity, broadband detection and large array capability for the all sky survey of the Cosmic InfraRed Background (CIRB). Concretely, we developed a microwave kinetic inductance detector (MKID) array based on not conventional metal superconductors but nitride superconductors. We also automated the data acquisition system from the cooling through the measurement. The larger format array offers the further improvement of the imaging capability.

研究分野：超伝導デバイス、テラヘルツ工学

キーワード：テラヘルツ/赤外材料・素子 超伝導材料・素子 超精密計測 電波天文学

1. 研究開始当初の背景

光学インダクタンス検出器 [1](Microwave Kinetic Inductance Detector, MKID) とは 2003 年に米カリフォルニア工科大学で考案された歴史的に浅い新種の検出器であり、超伝導ギャップエネルギーより大きなエネルギーの光子入射によりクーパー対 (超伝導電子対) が解離されるとい現象を利用したものである (図 1)。具体的には、クーパー対の解離によって生じる準粒子数密度の変化により、光検出アンテナの下流に位置するマイクロ波回路の共振周波数 (すなわち超伝導体特有の光学インダクタンス成分) が変化することを利用して、透過するマイクロ波の振幅または位相の変化を測定するものである。MKID は単層膜で素子作製が可能なことや (時間分割ではなく) 周波数分割による多ピクセルの同時読み出しができることから、将来的な大規模アレイ化が容易という利点があり、低い雑音環境下の宇宙空間において、現実的な観測時間内で、原始天体からの熱的放射: 宇宙赤外線背景放射 (Cosmic InfraRed Background, CIRB) の全天観測が実現可能なポテンシャルを秘めている。

近年諸外国ではミリ波検出を目的としたアルミニウム製 MKID の開発が主流であり、また、国内でも開発の重要性が認識されつつある昨今、我々は CIRB 観測を念頭に置いた MKID 開発の試みに着目した。

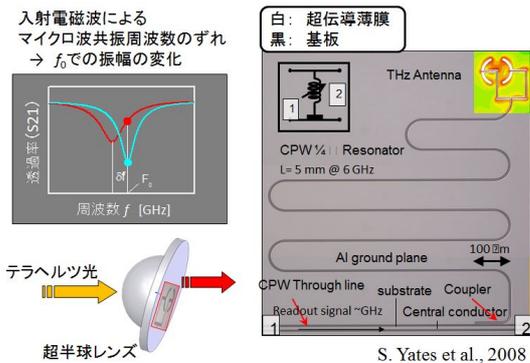


図 1. MKID の動作原理

2. 研究の目的

本研究の目的は、CIRB (サーブ) の全天観測という新たな研究領域を切り拓くべく、超高感度・広帯域・大規模アレイ性能を兼ね備えたテラヘルツ波検出器 (レシーバー) を創成することにある。具体的には、従来の金属系超伝導材料に比べて高い転移温度をもつ窒化物系超伝導材料を導入することで、新たな MKID アレイを開発し、同時読み出し回路を構築して冷却から計測制御に至る全自動化を目指した。

3. 研究の方法

以下に、検出器の設計、作製、および性能評価 (マイクロ波共振特性、テラヘルツ光学特性) に分けて述べる。

(3-1) 設計の指針

1 THz 以上での広帯域放射が示唆される CIRB 観測に適した MKID アレイを実現するために、広帯域テラヘルツ光アンテナとして動作するスパイラルアンテナ [2] と Rewound スパイラル型マイクロ波共振器 [3] の構造の類似性に着目し、Rewound スパイラル型マイクロ波共振器そのものが広帯域テラヘルツ光アンテナとして動作する「スパイラル型 MKID (Spiral-MKID)」を考案した [4]。図 2 は広帯域のテラヘルツ光アンテナ、かつ高 Q マイクロ波共振器として機能するように設計した Spiral-MKID の構造である。本設計は、テラヘルツ光アンテナのターン数を線路全長がマイクロ波の 2 分の 1 波長程度になるまで増大させると、マイクロ波に固有共振周波数をもつ共振器として動作すること、かつテラヘルツ光アンテナの性能を阻害しないという事実に基づいている。

以上の指針を踏まえ、高感度・広帯域・省スペースという 3 つの問題を同時に克服するために、電磁界解析ソフトウェア (SONNET) を用いて Spiral-MKID アレイの設計・動作解析および最適化を行った。

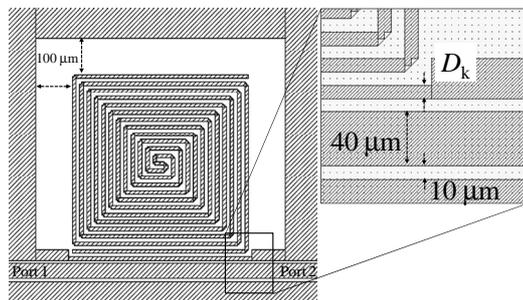


図 2 典型的な Spiral-MKID の構造

(3-2) 作製の指針

^3He 冷凍機 (最低到達温度 $\sim 0.3 \text{ K}$) 動作で高感度化を達成するための材料探索と手法を検討してきた。その結果、超薄膜 ($< 10 \text{ nm}$) で高い超伝導転移温度 (T_c) が達成可能という観点から、窒化ニオブ (NbN) と窒化タンタル (TaN) が最有力候補と予見した。 $T_c \sim 15 \text{ K}$ をもつ NbN は光検出の最小周波数が 1.1 THz ($270 \mu\text{m}$) であるものの、MKID の検出感度を早期に検証することが可能である。また、 $T_c \sim 10 \text{ K}$ をもつ TaN はこれまでに別種の検出器で実績のある材料であり、MKID としての成膜条件や設計の最適化が必要なもの、光検出の最小周波数は 0.7 THz ($410 \mu\text{m}$) が期待される。

以上の指針を踏まえ、NbN と TaN の高品質成膜条件の確立、および MKID への加工を行った。また、さらなる高性能化のために、豊橋技術科学大学では小型スパッタ装置を用いて、MKID に適した新たな超伝導材料 (NbTiN) の検討を開始した。

(3-3) 性能評価の方法

a) マイクロ波共振特性

作製した MKID チップは SMA コネクタ付きマウント治具のマイクロ波入出力線とグラウンド面に直径 25 μm の Al ワイヤーによりボンディングし、 ^3He 冷凍機内のコールドステージに設置した。その後、市販のベクトルネットワークアナライザを用いて S パラメータの測定を行った。

b) テラヘルツ光学特性

まず、検出器 1 画素の光学特性（周波数スペクトル、検出感度、応答時間）を評価した。その際、フーリエ変換分光器による直接データ収集を可能にするために、（従来のネットワークアナライザを用いた測定系ではなく）IQ ミキサを用いた測定システムを新たに構築した（**図 3**）。この測定システムは、マイクロ波周波数を固定のもと、マイクロ波発生器から出力した電力（+16 dBm）をパワースプリッタで 2 分割し、一系統は IQ ミキサの LO 端子に直接入力する。もう一系統は減衰器（-53 dB）を介してクライオスタット内の MKID チップへ入力し、冷却段の HEMT アンプ（+30 dB）および室温のアンプ（+28 dB）で増幅後に IQ ミキサの RF 端子に入力するものである。そうして取り出した IQ 出力電圧はアナログ演算器を用いて振幅信号 R ($=\sqrt{I^2+Q^2}$) に変換し、フーリエ変換分光器専用 PC に入力してスペクトルに変換した。

次に、2 次元アレイの光学評価に際しては、上記の IQ ミキサを用いた 1 画素測定系ではなく、計測制御ソフトウェア LabVIEW を駆使してネットワークアナライザからの多画素測定系を構築した。

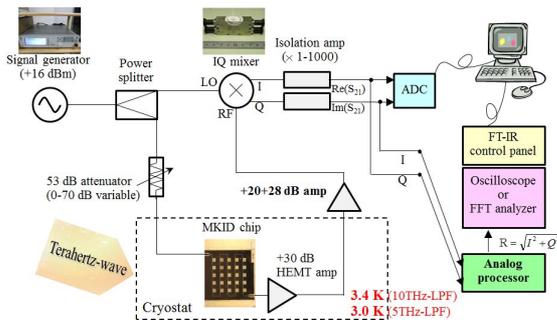


図 3 Spiral-MKID の光学特性評価用セットアップ

4. 研究成果

(4-1) 設計の結果

アレイの設計最適化に関しては、1 画素設計の知見をもとに、1 次元アレイ設計に重点を置いた検討を進めた。具体的には、マイクロ波共振器の形状として「対称型スパイラル」パターンを用い、画素間のクロストークをシミュレーションにより解析した。**図 4** は 2 画素解析モデルを示しており、横方向(a)、

および縦方向(b)での解析を行った。その結果、画素間距離が最密となる 600 μm に近づけた場合でも画素間干渉係数は 0.1 % 以下であり、また、周波数間隔を 10 MHz とした場合でも同様に画素間干渉係数は 0.1 % 以下であることを解析的に明らかにした。

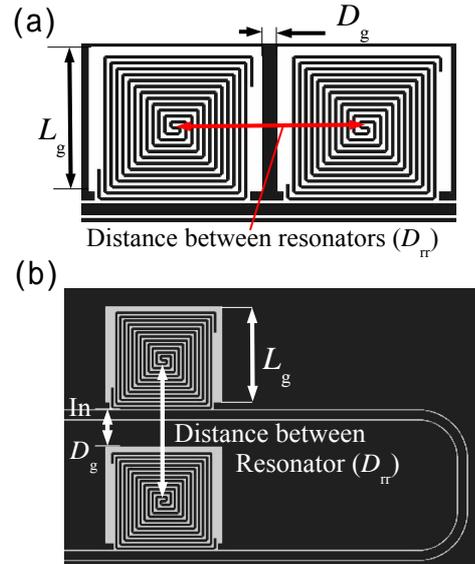


図 4 対称型スパイラルパターンの 2 画素解析モデル

(4-2) 作製の結果

DC マグネトロンスパッタ装置を用い、2 種の窒化物系超伝導材料（NbN, TaN）を主軸として材料開発を進めた。まず、NbN 膜に関しては基板種やスパッタ時に流れる電流のコントロールにより組成比を精密に制御した。一方、TaN に関しては Ta と N が 1 対 1 の組成比と薄膜の均質性を併せもつ成膜条件を見出した。なお、これら 2 種の薄膜サンプルについては ^4He 冷凍機に設置・冷却し、 T_c の測定を行った。その結果、NbN 膜ではサファイア基板上で約 16 K（150 nm 厚）、TaN 膜では MgO 基板上で 8.7 K（約 100 nm 厚）という、バルクの T_c に匹敵する高品質薄膜を実現した。

次に、異なるマイクロ波共振線路長をもつ Spiral-MKID を 25 (=5 × 5) 画素分配置したフォトマスクを作成し、フォトリソグラフィー



図 5 10mm 角のサファイア基板上に作製した NbN 製 Spiral-MKID の 25 画素アレイ

および反応性イオンエッチング装置を用いてMKIDを試作した。一例として、**図5**に一边10 mm角のR面サファイア基板に作製したNbN製Spiral-MKIDアレイの写真を示す。

(4-3) 性能評価の結果

a) マイクロ波共振特性

図6にベクトルネットワークアナライザを用いて測定したマイクロ波通過特性(S21)を示す。同図より、2.75~2.95 GHzの範囲に明瞭な25本の共鳴吸収線を確認できる。また、共振Q値は約1万(ディップ~10dB)という良好な共振特性が得られた。

さらに、**図7**に示す通り、25画素アレイの共振周波数の設計値に対する測定値のずれは、複数のチップで最大1%の範囲内、かつ、2チップ間の個体差は0.1%以内で同等であることが判明し、設計値通り、かつチップ間で個体差の少ない25画素アレイが実現した。今後、さらなる大規模アレイ化への拡張が比較的容易になると考えられる。

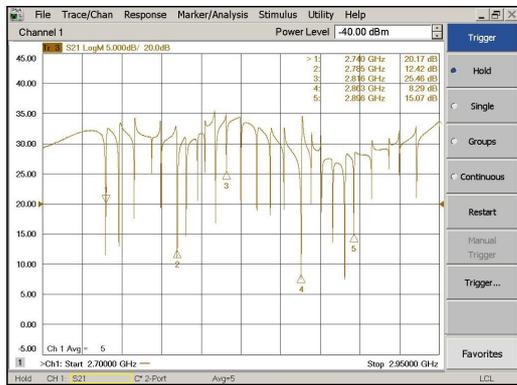


図6 25画素アレイのマイクロ波共振特性 (動作温度 2.9 K)

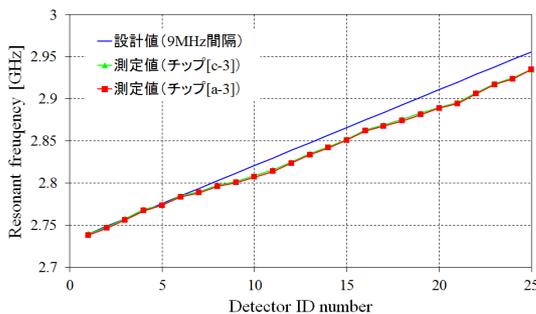
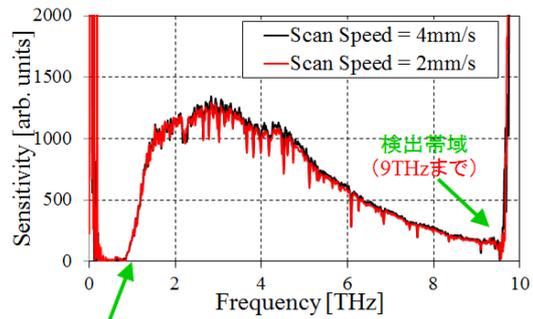


図7 25画素アレイの共振周波数の比較 (動作温度 2.9 K)

b) テラヘルツ光学特性

まず、1画素の特性評価について、フーリエ変換分光器内部の可動鏡の走査速度を変えて測定したSpiral-MKIDの周波数スペクトルを**図8**に示す。その結果、NbNの超伝導ギャップ周波数に対応して1 THzを境に急峻な感度上昇を確認し、一方で高周波側では約9 THzに至る広帯域特性を実験的に明らかにした。



NbN膜のクーバー対崩壊(>1THz) ← $T_c=12.7$ K

図8 Spiral-MKIDのテラヘルツスペクトル

また、黒体炉を用いたHot-Cold (1200~300 K)の実験により、黒体炉の開口窓(直径0.0125~0.6 inch)を変えてIQミキサからのR出力電圧を取得し、一方、テラヘルツ光の非照射時にマイクロ波周波数(2.756 GHz)固定のもと、FFTアナライザを用いてIQミキサからのR出力電圧をスペクトル解析した結果、Spiral-MKIDの検出感度は雑音等価電力(NEP)にして 10^{-13} W/√Hz (@ 3 K)、 10^{-14} W/√Hz (@ 0.5 K)という良好な値を実験的に示した。さらに、黒体炉実験において光学チョッパーの回転周波数(100~3000 Hz)を変えてIQミキサからのR出力電圧を取得することにより、応答時間80 μsを確認した。

最後に、2次元アレイの特性評価については、PC制御のアレイ読み出しソフトウェアを設計・開発し、これに³He冷凍機システムを組み合わせることで、冷却から計測に至る自動化を達成した。具体的には、計測制御ソフトウェアLabVIEWを駆使してネットワークアナライザからの多画素測定系を構築し、かつフーリエ変換分光器の試料室に光学チョッパーを配置することで、液体窒素をテラヘルツ光源とする結像光学系を用いたリアルタイム25画素同時計測を実現した(**図9**)。今後の大規模アレイ化により、イメージング性能のさらなる向上が期待される。

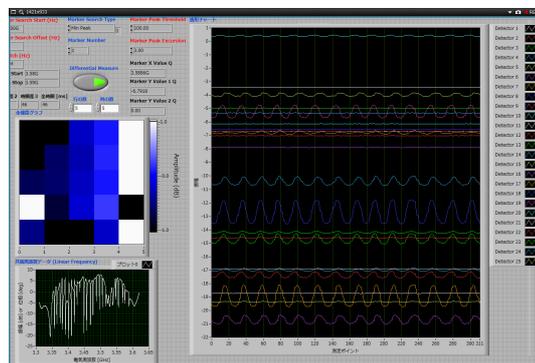


図9 25画素イメージングデータ取得画面 (左上図は25画素アレイの強度マップ、左下図は25本のマイクロ波共振特性、右図は回転する光学チョッパーの開閉に同期したタイムチャートを表す。)

<引用文献>

P. K. Day et al, "A broadband superconducting detector suitable for use in large arrays", Nature, Vol.425, 2003, pp.817-821

E. R. Brown et al., "Characterization of a planar self-complementary square spiral antenna in the THz region", Microwave and Opt. Technol. Lett., Vol.48, 2006, pp.624-528

Z. Ma and Y. Kobayashi, "Miniaturized High-Temperature Superconducting Microstrip and Coplanar Waveguide Filters", IEICE Trans. Electron., E88-C, No.7, 2005, pp.1406-1411

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, Vol.45, 2013, pp.213-216

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計9件)

S. Ariyoshi, K. Nakajima, A. Saito, T. Taino, C. Otani, H. Yamada, S. Ohshima, J. Bae, S. Tanaka, "Terahertz Response of NbN-based Microwave Kinetic Inductance Detector with Rewound Spiral Resonator", Superconductor Science and Technology, Vol.29, 2016, pp.035012_1-5 DOI:10.1088/0953-2048/29/3/035012

A. Saito, K. Nakajima, K. Hayashi, Y. Ogawa, Y. Okuyama, D. Oda, S. Ariyoshi, H. Yamada, T. Taino, C. Otani, J. Bae, S. Ohshima, "Relationship between Loaded Quality Factor and Responsivity for NbN-Based MKIDs using Dual-Function Spiral Strip", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.25, 2015, pp.2401204_1-4 DOI:10.1109/TASC.2014.2367459

K. Hayashi, A. Saito, Y. Ogawa, M. Murata, T. Sawada, K. Nakajima, H. Yamada, S. Ariyoshi, T. Taino, H. Tanoue, C. Otani, S. Ohshima, "Design and Fabrication of Microwave Kinetic Inductance Detectors using NbN Symmetric Spiral Resonator Array", Journal of Physics: Conference Series (JPCS), Vol.507, 2014, pp.042015_1-4 DOI:10.1088/1742-6596/507/4/042015

S. Ariyoshi, K. Nakajima, A. Saito, T. Taino, C. Otani, X. Yu, K. Tsukada, K. Nakajima, K. Motoshita, Y. Ogawa, H. Yamada, S. Ohshima, J. Bae,

"Two-dimensional Microwave Kinetic Inductance Detector array for an Imaging Terahertz Spectrometer", Proceedings of 2014 Korea-Japan Microwave Workshop (KJMW2014), 2014, TH_4A_1

中島 健介, 齋藤 敦, 有吉 誠一郎, 山田 博信, ベイ ジョンソク, 大嶋 重利, "多重機能スパイラルを集積した超伝導マイクロ波カイネティックインダクタンス検出器(MKIDs)の開発", 信学技報, Vol.114, 2014, pp.93-96

S. Ariyoshi, K. Nakajima, A. Saito, T. Taino, C. Otani, Current Status of MKIDs Imaging, Superconductivity Web21, May issue, 2014, pp.9-11

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", Applied Physics Express, Vol.6, 2013, pp.064103_1-3 DOI:10.7567/APEX.6.064103

A. Saito, K. Hayashi, K. Nakajima, S. Ariyoshi, Y. Ogawa, H. Yamada, T. Taino, H. Tanoue, C. Otani, J. Bae, S. Ohshima, "Microwave property and optical response of MKIDs using NbN symmetrical spiral resonator array", Proceedings of 38th International Conference on Infrared, Terahertz and Millimeter Waves (IRMMW-THz2013), 2013, Th P3-18 DOI:10.1109/IRMMW-THz.2013.6665790

林 賢人, 齋藤 敦, 小川 裕平, 村田 光茂, 田中 希, 澤田 俊宏, 中島 健介, 山田 博信, 有吉 誠一郎, 田井野 徹, 田之上 寛之, 大谷 知行, 大嶋 重利, "スパイラル共振器を用いたマイクロ波力学インダクタンス検出器アレイの設計と評価", 信学技報, vol.113, no.11, SCE2013-8, 2013, pp. 39-42

[学会発表](計13件)

S. Ariyoshi, K. Nakajima, A. Saito, T. Taino, H. Yamada, S. Ohshima, C. Otani, J. Bae, S. Tanaka, "Optical Evaluation of Microwave Kinetic Inductance Detectors for Fourier Transform Terahertz Spectroscopy", 12th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2015), Lyon, France, (Sep. 6-10, 2015)

A. Saito, K. Nakajima, K. Hayashi, Y. Ogawa, D. Oka, S. Ariyoshi, H. Yamada, T. Taino, C. Otani, S. Ohshima, "Development of Two-Dimensional THz Imaging System using Spiral-MKID Array", 12th European Conference on

Applied Superconductivity (EUCAS2015), Lyon, France, (Sep. 6-10, 2015)

H. Yamada, T. Abe, Y. Ogawa, D. Oka, A. Saito, S. Ohshima, S. Ariyoshi, K. Nakajima, "TaN Thin Films for Microwave Kinetic Inductance Detectors", 15th International Superconductive Electronics Conference (ISEC2015), Nagoya, Japan, (July 6-9, 2015)

[Invited Oral] S. Ariyoshi, K. Nakajima, A. Saito, T. Taino, C. Otani, X. Yu, K. Tsukada, K. Nakajima, K. Motoshita, Y. Ogawa, H. Yamada, S. Ohshima, J. Bae, "Two-dimensional Microwave Kinetic Inductance Detector array for an Imaging Terahertz Spectrometer", 2014 Korea-Japan Microwave Workshop (KJMW2014), Suwon, Korea, (Dec. 4-5, 2014)

[Invited Oral] S. Ariyoshi, K. Nakajima, A. Saito, T. Taino, C. Otani, X. Yu, K. Tsukada, K. Nakajima, K. Motoshita, Y. Ogawa, H. Yamada, S. Ohshima, J. Bae, "NbN-based Microwave Kinetic Inductance Detectors for an Imaging Terahertz Spectrometer", 27th International Symposium on Superconductivity (ISS2014), Tokyo, Japan, (Nov. 25-27, 2014)

[Invited Oral] S. Ariyoshi, "Optical Evaluation of NbN-based Microwave Kinetic Inductance Detectors in Terahertz Range", Second Yonezawa Conference-Superconducting Electronics, Materials and Physics (YC-SEMP2014), Yonezawa, Japan, (Oct. 14-15, 2014)

[Invited Oral] S. Ariyoshi, "Microwave Kinetic Inductance Detector for an Imaging Fourier Transform Terahertz Spectrometer", BIT's 3rd Annual Conference and EXPO of AnalytiX2014, Darlin, China, (April 25 - 28, 2014)

山田 博信、小川 裕平、岡 大輝、齊藤 敦、大嶋 重利、有吉 誠一郎、中島 健介、"TaN 薄膜を用いたマイクロ波力学インダクタンス検出器の作製"、第 62 回応用物理学学会春季学術講演会、神奈川、2015 年 3 月 12 日

【チュートリアル講演】中島 健介、齊藤 敦、有吉 誠一郎、山田 博信、ベイ ジョンソク、大嶋 重利、"多重機能スパイラルを集積した超伝導マイクロ波カイネティックインダクタンス検出器(MKIDs)の開発"、電子情報通信学会 アンテナ・伝播研究会、2014 年 11 月 12-14 日

有吉 誠一郎、中島 健介、齊藤 敦、小川 裕平、兪 熊斌、田井野 徹、大谷 知行、山田 博信、大嶋 重利、塚田 究、中島 恵、本下 要、裴 鐘石、"NbN 製力学インダクタ

ンス検出器のテラヘルツ光学特性評価"、2014 年秋季 第 75 回応用物理学学会学術講演会、北海道、2014 年 9 月 20 日

兪 熊斌、裴 鐘石、有吉 誠一郎、"マイクロ波力学インダクタンス検出器のテラヘルツ波検出特性"、IEEE MTT-S Nagoya Chapter 主催 平成 26 年度 学生発表会 "Midland Student Express 2014 Spring"、名古屋、2014 年 4 月 25 日

【招待講演】有吉 誠一郎、中島 健介、齊藤 敦、林 賢人、田井野 徹、大嶋 重利、大谷 知行、兪 熊斌、裴 鐘石、"2次元テラヘルツ分光用 MKID アレイの研究開発"、電子情報通信学会 2014 年総合大会、チュートリアルセッション「超伝導検出器を用いた先端センシングシステム」新潟、2014 年 3 月 20 日

S. Ariyoshi, K. Nakajima, A. Saito, T. Taino, H. Tanoue, K. Hayashi, H. Yamada, S. Ohshima, C. Otani, J. Bae, "Terahertz Response of a Microwave Kinetic Inductance Detector with an NbN Spiral Resonator", 11th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2013), Genova, Italy, (Sep. 15 - 19, 2013)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.tut.ac.jp/university/faculty/ens/774.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

有吉 誠一郎 (ARIYOSHI, Seiichiro)
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号： 20391849

(2) 研究分担者

ベイ ジョンソク (BAE, Jongsuck)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号： 20165525

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

(3) 連携研究者

齊藤 敦 (SAITO, Atsushi)
山形大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号： 70313567

松尾 宏 (MATSUO, Hiroshi)
国立天文台・先端技術センター・准教授
研究者番号： 90192749