

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：82626
 研究種目：基盤研究(A) (一般)
 研究期間：2015～2017
 課題番号：15H02251
 研究課題名(和文) 超伝導検出器多画素化と冷却系簡素化を両立するマトリョーシカ型周波数多重読出回路

研究課題名(英文) Microwave Multiplexers in Matryoshka Manner for Large-Format Superconducting Detector Arrays with Small & Simple Cryocoolers

研究代表者
 神代 暁 (Kohjiro, Satoshi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究グループ付

研究者番号：60356962
 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,600,000円

研究成果の概要(和文)：半導体等他検出器を凌駕する低雑音性を持つ反面、受光面積や計測時間で劣る超伝導検出器の欠点を解消し、小型・低消費電力・廉価な極低温冷却系の基での大規模な多画素化を可能とする、極低温下のマイクロ波帯周波数多重読出回路(MW-Mux)を採り上げる。MW-Muxを使う高分解能分光において、室温回路が1本の読出線上への多重化画素数Uを制約する現状を打破し、極低温回路の広帯域性をU増大に充分活かせる新方式を提案するとともに、プロトタイプ開発、基本動作実証、および性能評価を行った。その結果、従来型MW-Muxに比べ遜色ない低い雑音と画素間クロストークを実証し、将来的な大規模多画素化の礎を築いた。

研究成果の概要(英文)：Superconducting microwave multiplexers (MW-Mux) are attracting much attention for decreasing the heat load to the cryocooler for superconducting detector arrays (SDA), which provide much lower noise than other detectors such as semiconductor-based, but also disadvantage such as smaller detection area and resulting longer measurement time. We have proposed a new-type MW-Mux that relaxes a restriction of number of pixels multiplexed on a readout line U attributed to the bandwidth or spurious-free power of a room-temperature electronics in a conventional MW-Mux. In our new MW-Mux, U can be increased up to the potential value that wideband cryogenic circuits can provide. We have demonstrated noise and inter-pixel crosstalk of the prototype are equal to those of a conventional MW-Mux. This result will open the door to the large format SDA implemented in a future high-resolving and compact spectrometer in x-ray and optical regions.

研究分野：超伝導エレクトロニクス

キーワード：Microwave Multiplexer 周波数多重読出回路 超伝導検出器 多画素化 超伝導マイクロ波共振器 SQ
 UID(超伝導量子干渉素子) TES(超伝導転移端センサ) クロストーク

1. 研究開始当初の背景

ミリ波からガンマ線までの9桁にも渡る広い周波数帯の電磁波や、エネルギー粒子の検出に際し、半導体等他の検出器を凌駕する低雑音性を示す超伝導検出器の普及の鍵技術は、他の検出器に比べ2-3桁劣る受光面積の増大と、その結果として現れる計数率向上に伴う計測時間の短縮である。一方、超伝導検出器は原理上、検出器体積増大に対し、入射光子・粒子のエネルギーに対する出力の比(感度)が低下する。このため、微小検出器の多画素化により受光面積を稼ぐ手法がとられる。また、多画素化による短時間イメージング機能も期待される。この時、画素数分の読出配線を、検出器のある極低温から室温まで結線すると、室温から極低温への熱流入増大のため、超伝導検出器システムの体積・価格・消費電力を支配する極低温冷凍機の強化を要する。この問題を解決する鍵が、多画素検出器出力を極低温で1本の読出線に束ねる多重読出回路(図1)である。

これまで、4種類の多重読出回路が提案、研究されて来た。スイッチにより読出画素を時間的に切替える時間分割(TDM)、スイッチにより信号を重畳する各画素の極性を時間的に切替えるコード分割(CDM)、画素毎に異なる周波数で駆動・出力を重畳し、画素毎の駆動周波数で復調する周波数分割(FDM)、多重化回路のマイクロ波透過率の周波数依存性が、検出器出力の変調を受けることを利用するマイクロ波多重(MW-Mux)である。本研究では、他の3方式に比べ、1本の読出線あたりに多重化可能な画素数 U の飛躍的増大

が可能な MW-Mux を採り上げる。

MW-Mux は、極低温回路と室温回路から構成され、前者の主要素は、超伝導多重化チップ(図2(a)の MUX Chip)と後段の冷却半導体増幅器(図2(a)の Cryo. HEMT)である。MUX Chip(図2(b))において、画素毎に共振周波数 f_R が異なる共振器群(図2(a)の #1, #2, ...)の一端を、インダクタンス L_S が検出器出力電流の非線形関数となる超伝導量子干渉素子(SQUID)で終端し、他端に結合容量を介した共通読出線(図2(a)の Port 1-Port 2 間)を接続する。Port 1-2 間のマイクロ波透過率 S_{21} は、周波数 $f \approx f_R$ で低下し他の f に対し約1(=0 dB)となる(図2(c))。SQUID の L_S は入力磁束 Φ_A に対し磁束量子 $\Phi_0 (=h/(2e))$; h はプランク定数、 e は単位電荷)周期で変化する。この機能により、各画素の検出器入射光子エネルギー E に応じた量だけ、対応する共振器の f_R が変調され、その結果、 $f \approx f_R$ における S_{21} の f 依存性を全画素分同時に読み取ることで、全画素に対する E の情報を得る。

MW-Mux の U は次式で表される。

$$U = \frac{B}{\kappa f_s} \quad (1)$$

$$\kappa = \frac{\Delta f_R}{f_s} \quad (2)$$

但し、 B は読出回路の帯域、 Δf_R は周波数軸上での隣接画素との共振周波数間隔(図2(c))、 f_s は1画素あたりの信号周波数の最大値であり、画素間干渉(クロストーク)に基づく出力を、本来の信号に基づく出力の 1×10^{-3} 倍以下に抑制するためには、 $\kappa \geq 10$ が必要とされる。例えば、 $\kappa=10$ 、電子線照射蛍光 X 線分析に必要な $f_s \approx 100$ kHz、極低温増幅器の典型的帯域 $B=4$ GHz を(1)式に代入すると、 $U \approx 4 \times 10^3$ を得る。この値は、TDM や CDM の実現値 40 を遥かに凌ぐ。また、他の3方式と異なり、極低温下の読出素子の発熱が検出器の発熱より小さく、この点でも MW-Mux は画素数増大に有利である。

一方、 $E/\Delta E \geq 1 \times 10^3$ (ΔE : エネルギー分解能)の精密分光を想定すると、 B は、極低温回路でなく室温回路で現状制約される。広帯域仕様の室温回路開発は U 増大の1つの解であり、この方針を掲げる海外機関は存在する。しかし、広帯域性を持つとともに、低雑音性や入出力特性の線形性を損なわず U に比例し増大する信号電力を扱い得る室温回路の開発は、技術的ハードルが高くかつ多額の資金を必要とし、容易ではない。

2. 研究の目的

1で述べた問題の解決のため、 U の制約をもたらす1系統あたりの画素数を M ($M < U$)にとどめた室温回路を N 個並列動作させ、周波数軸上に $U=N \times M$ 個の画素信号を重複なく並べる(図3(a))ことにより、 U 個の信号を

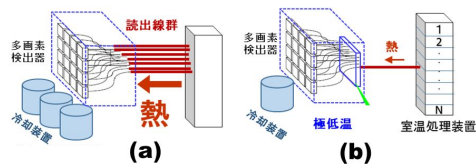


図1. 多画素超伝導検出器の読出法 (a) 個別読出 (b) 多重読出)と室温から極低温への配線経路の流入熱

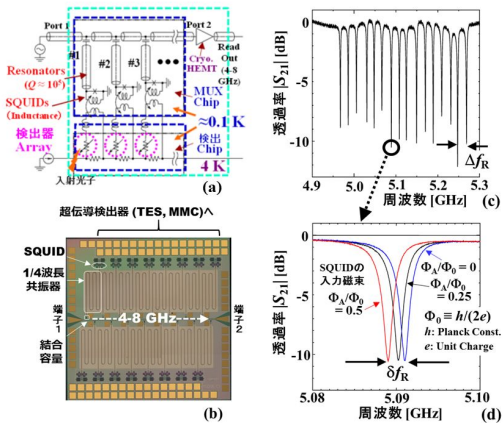


図2. MW-Mux の(a)構成 (b)超伝導チップ(5 mm×5 mm) (c)マイクロ波透過率の周波数依存性 (d)1画素に関する透過率の周波数依存性; Φ_A に対し Φ_0 周期の応答

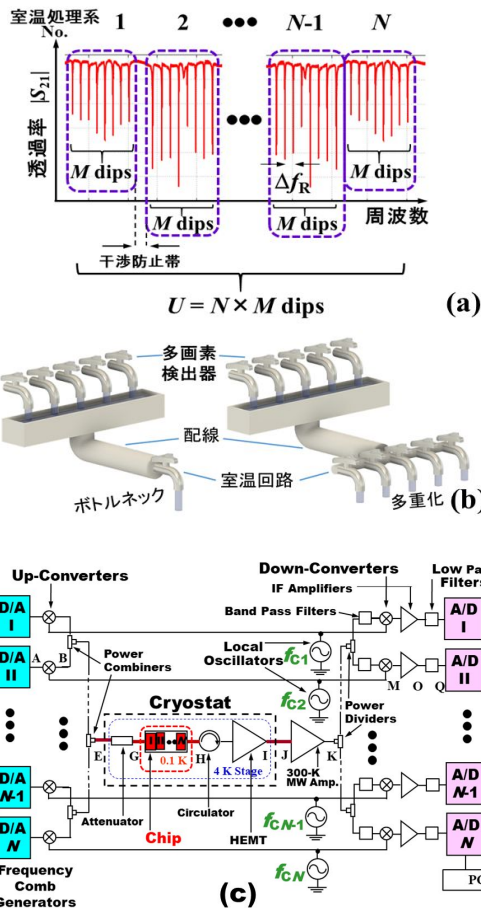


図 3. 新提案のマトリョーシカ方式 (a) 周波数軸での U 画素の共振周波数 f_R の配置 (b) 従来型 MW-Mux (左) と本方式 (右) (c) 回路構成 { D/A: f_R に整合する単一周波数の信号発生、Up-Converter: 低周波からマイクロ波への周波数変換 (変調器)、Cryostat: 極低温部、Down-Converter: マイクロ波から低周波への周波数変換 (復調器)、Local Oscillator: 周波数変換基準用発振器、A/D: 出力の PC 取込用ディジタル }

1 本の読出線で扱うことを可能とする、複数室温処理系 & 極低温統一配線方式 (研究提案時にマトリョーシカ方式と命名; 成果公開時の学術論文上は Frequency Domain Cascading MW-Mux と命名) を提案する。具体的には、従来の MW-Mux (図 3(b)左) では単一であった低周波とマイクロ波の間の変換の基準周波数を、本方式 (図 3(b)右) では室温処理装置毎に個別の値 (図 3(c)の $f_{C1}, f_{C2}, \dots, f_{CN}$) に設定した。幅広い周波数帯域の電気信号へと変換されるので、各周波数帯域用の室温処理装置を複数並列化することで、全画素からの信号を 1 本の読出線で扱うことが可能となる。

一方、マトリョーシカ方式の懸念点は、変調時に多重化した複数の室温処理回路の担当帯域が、復調時に干渉し、画素間クロストークや雑音の増大を来す危険性にある。その防止策として、異なる室温回路の担当帯域間に干渉防止帯 (図 3(a)) が必要 (2) 式で従来法に比べ k を増大することに相当) ならば、 U は (1) 式で示す潜在値より小さくなり、本方式の価値は薄らいでしまう。

本研究の目的は、 $N=2$ のプロトタイプを構築した上での、マトリョーシカ方式の基本動作実証と、雑音や画素間クロストークが従来型 MW-Mux に比べ劣らないための技術開発にある。

3. 研究の方法

超伝導チップの設計には電磁界シミュレータや電子回路シミュレータを用いた。チップ作製には、産総研にある共同利用クリーンルーム CRAVITY (Clean Room for Analog digital superconductivity) を利用した上で、電気特性評価や微細構造観察を通して評価作製条件を最適化した。室温回路は、私達の設計を基に、仕様に見合う市販部品を購入し、組み立てた。効率的な研究進捗を図るため、複数室温回路間の同期法の調査や筐体加工を外注した。

これらを基に、2 で述べた雑音や画素間クロストークに関する新旧方式の比較のための定量評価法を確立した。雑音評価に関しては、本研究着手前に構築していた絶対温度 4 K での Chip 評価系を、実際に X 線・ガンマ線領域で必要とされる 0.1 K 冷却 Chip 用にグレードアップした。また、東大製の超伝導転移端検出器 (TES) と産総研製 MW-Mux の協調動作実証と性能評価を行うため、TES チップと MW-Mux チップを実装するモジュールを開発するとともに、これを極低温下に置き室温の放射線源から TES へ光子入射できる実験系を開発した。これを用い、TES への入射信号の有無の出力差から読出雑音を評価した。また、出力波高値の分布を理論式にフィッティングすることにより、エネルギー分解能と、その中で読出回路雑音の寄与を求めた。また、定量性に優れた画素間クロストーク評価法を開発し、まず、従来型 MW-Mux におけるクロストークを評価した。その結果、チップ上の電磁界干渉を他要因からの寄与以下、すなわち 1×10^{-3} 以下のクロストーク量に抑えるための読出回路チップ上の画素配列指針を見出した。次に、この指針に沿った配列を基に、従来型とマトリョーシカ型の対照実験を行い、クロストーク量を比較した。

工夫を凝らした点は、2 で述べた干渉防止帯の撤廃と (1) 式で示す U 値実現のため、室温回路中の図 3(c) に示す位置に挿入した、適当な周波数特性と遮断周波数を持つ低域通過フィルタ (Low Pass Filters) である。このフィルタが、4 で述べる従来型に劣らぬ小さなクロストークをもたらした。

4. 研究成果

研究目的に沿った成果を (1)、(2) に、当初予期しなかった成果を (3)、(4) に記述する。

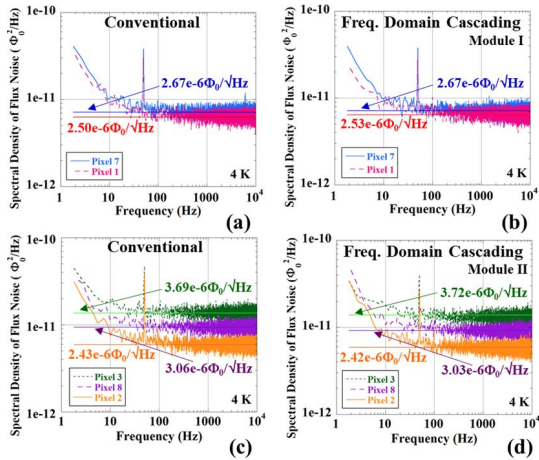


図 4. 5 画素の磁束換算雑音の周波数依存性 (a), (c) 従来型 (同一室温回路内処理) (b) 本方式の第 1 室温回路内処理 (d) 本方式の第 2 室温回路内処理

(1) マトリョーシカ方式プロトタイプの基本動作実証・性能評価

本研究にて提案した新方式の基本動作実証と、雑音および画素間クロストークの比較を、最も単純な 2 系統 6 画素の室温処理回路から成るプロトタイプで行った。SQUID 入力換算雑音磁束スペクトル密度の周波数依存性を図 4 に示す。画素 1, 7 を図 4(a), (b) に、画素 2, 3, 8 を図 4(c), (d) に示し、(a), (c) は従来方式での、(b), (d) は新方式での結果である。図 4 より、新方式の雑音は、従来型 MW-Mux の雑音と等しい。また、画素間クロストークに関して、新方式は従来型に比べ増えないことを実証した。新方式は、信号電力を既存室温回路の正常動作範囲に抑えつつ、(1) 式で示す U 値を達成できる概念上の優位性を持っており、従来型 MW-Mux に比べ変わらない雑音や画素間クロストークの実証規模を、新規獲得研究予算の基で今後拡大することにより、その有用性と実用性を一層明瞭に示すことが期待される。

(2) 2 画素 TES 同時読出と読出雑音評価

開発途上の MW-Mux を、東大で作製した 2 画素の硬 X 線・ γ 線用 TES の同時読出に用いた。TES にはホルミウム(Ho)放射線源からの 184 keV の放射線を照射した。図 5 (a), (b) に各画素で得たスペクトルを示す。実測スペクトルの数値モデルとのフィッティングにより、エネルギー分解能が各々 $\Delta E = 128, 115$ eV と求まった。このうち、読出回路の寄与は、各々 $\Delta E_{RO} = 67, 57$ eV であった。すなわち、TES や冷凍機の温度ゆらぎ等、他の雑音源からの寄与 $\Delta E_{int} = \sqrt{(\Delta E)^2 - (\Delta E_{RO})^2} = 109, 100$ eV の約 60% に ΔE_{RO} を抑えることに成功した。言い換えると、私達の現状の MW-Mux は、分光器のエネルギー分解能を、 $\Delta E - \Delta E_{RO}$

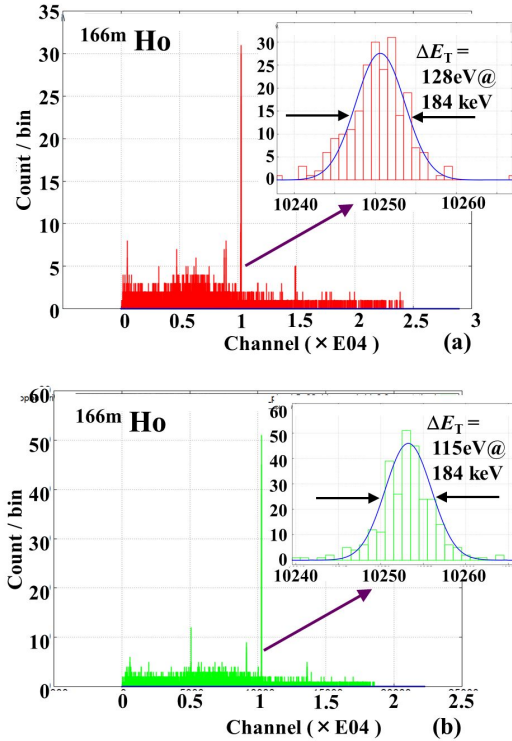


図 5. 産総研製 MW-Mux で読出した ^{166m}Ho 照射下の東大製 2 画素 TES 出力と、理論曲線とのフィッティングによる ΔE 算出 (a) 画素 1 (b) 画素 2

$= 128 - 109 = 19, 115 - 100 = 15$ eV だけ悪くする程度の雑音源となっている。今後、海外機関に比べ TES-SQUID 間の結合が弱い現状の打破による $\Delta E_{RO}/\Delta E$ 低下の方向性や到達値を探り、更に ΔE_{int} が小さな TES 分光器への本 MW-Mux の適用性を明らかにしたい。

(3) 将来画素数増大に適用しやすい回路方式

冷却半導体増幅器の帯域 4-8 GHz の範囲で分布する共振周波数 f_R に対し、SQUID への入力磁束による f_R の最大変化幅 δf_R (図 1(d)) を一定値としたい。そのためには、共振器-SQUID 結合度を f_R に依存して画素毎に変化させる必要がある。他機関では、共振器-SQUID 間を相互インダクタンス M_{MW} を介した磁気結合 (図 6 (a)) としている。一方、TES からの信号入力線と SQUID との間には、 M_{MW} よりも大きな相互インダクタンス M を介した磁気結合を要する。 $M_{MW} \ll M$ 実現のため、SQUID 近傍に TES との磁気結合用コイルを巻き、その外側に共振器との磁気結合コイルを這わせるデバイス構造を採る。この時、 M_{MW} 値は、共振器-SQUID 間結合コイルのみならず、TES-SQUID 間結合コイルの形状や寸法にも依存する。このため、画素数増大時の設計が複雑になる。これに対し、産総研では、SQUID を構成するリング状超伝導電極の左右分枝の非対称度 a のみで共振器-SQUID 間結合強度を決定できる直接結合法を採用した。直接結合法 (図 6 (b), (c))

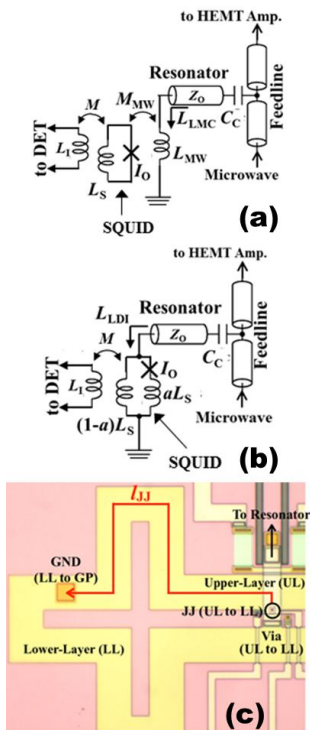


図 6. 共振器と SQUID との二結合方式 (a) 磁気結合型 (b) 直接結合型 (c) 直接結合型チップ; SQUID 電極の接地穴“GND(LL to GP)”の位置 (線路長 l_{JJ}) による非対称指数 a ((b)に示す) 調整が可。

では、同一の構造・形状・寸法の SQUID リングにより、 f_R にあわせ広範囲の a 値設定が可能ゆえ、画素数増大時の設計が磁気結合型に比べ簡単になる。

(4) 高い応答性を得るための共振器の材料

MW-Mux の感度向上と読出雑音低減には、急峻な周波数特性を持つ共振器が必要とされる。共振器のマイクロ波に対する損失の逆数として定義される無負荷 Q 値 Q_U が大きい程、一般的に周波数特性が急峻となる。このため、低マイクロ波損失の電極・基板材料の選択が重要になる。他機関の MW-Mux では、Si 基板上のニオブ (Nb) のみを材料としているが、産総研で

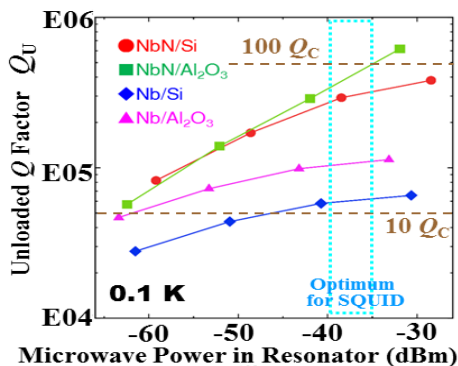


図 7. 4 種類の材料の共振器の性能指数である無負荷 Q 値 Q_U と、共振器内マイクロ波電力 P_{Res} との関係 (温度 0.1 K)

は、基板材料 2 通り (Si, サファイア (Al_2O_3)) × 電極材料 2 通り (Nb, 窒化ニオブ (NbN)) の 4 種材料の共振器を試作し、 Q_U を比較した。図 7 は、共振器に蓄積されるマイクロ波電力 P_{Res} と Q_U の関係である。図 7 より、4 種類いずれも P_{Res} に従い Q_U は増大し、共振器以外の損失の逆数 Q_C より 1 桁大であった。特に、SQUID が最低雑音動作する $-40 \leq P_{Res}(\text{dBm}) \leq -35$ の領域では、Si より Al_2O_3 、Nb より NbN が、高い Q_U 値を得た。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- S. Kohjiro, F. Hirayama, Frequency-domain cascading microwave superconducting quantum interference device multiplexers; beyond limitations originating from room-temperature electronics, *Supercond. Sci. Technol.*, 査読有, vol. 31, 2018, pp. 0350051-12, doi. 10.1088/1361-6668/aaa3c1
- Y. Nakashima, F. Hirayama, S. Kohjiro, H. Yamamori, S. Nagasawa, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, Adjustable SQUID-resonator direct coupling in microwave SQUID multiplexer for TES microcalorimeter array, *IEICE Elect. Expr.*, 査読有, vol. 14, 2017, pp. 20170271 1-11, doi. 10.1587/elex. 14. 20170271
- F. Hirayama, T. Irimatsugawa, H. Yamamori, S. Kohjiro, A. Sato, S. Nagasawa, D. Fukuda, H. Sasaki, M. Hidaka, Y. Sato, M. Ohno, H. Takahashi, Interchannel Crosstalk and Nonlinearity of Microwave SQUID Multiplexers, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 査読有, vol. 27, 2017, pp. 2500205 1-5, doi. 10.1109/TASC. 2016. 2638082
- T. Irimatsugawa, F. Hirayama, H. Yamamori, S. Kohjiro, A. Sato, S. Nagasawa, D. Fukuda, M. Hidaka, Y. Sato, M. Ohno, H. Takahashi, Study of Nb and NbN Resonators at 0.1 K for Low-Noise Microwave SQUID Multiplexers, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 査読有, vol. 27, 2017, pp. 2500305 1-5, doi. 10.1109/TASC. 2016. 2637865

[学会発表] (計 26 件)

- Y. Nakashima et al., Microwave SQUID multiplexing for Ti/Au bilayer TES X-ray microcalorimeter, 30th Int. Symp. Supercond., 2017/12/14.
- 山森弘毅他, マイクロ波読出し回路作製プロセスの改善と共振 Q 値の向上, 東北大電気通信研究所共同プロジェクト研究会, 2017/10/04 (招待)
- 神代暁, 超伝導遷移端検出器のマイクロ波帯多重化読出回路, 日本原子力学会 2017 年秋の大会, 2017/09/14 (招待)
- H. Yamamori et al., Study on Electrode

Property and Resonators' Q of Readout Circuits for Microwave Multiplexers, 3rd Int. Workshop Supercond. Sens. Det., 2016/11/17.

平山文紀, 産総研におけるマイクロ波 SQUID マルチプレクサ開発の現状, 東北 大電気通信研究所共同プロジェクト研究会, 2016/10/26 (招待)

T. Irimatsugawa et al., Evaluation and Improvement of Nb and NbN Microwave SQUID multiplexers for a gamma-ray TES with a Sn Absorber linked by Au Post, Appl. Supercond. Conf. 2016, 2016/09/05.

H. Yamamori et al., Fabrication and Characterization of Nb and NbN Microwave Resonators for multiplexed Readout of Superconducting Detector Arrays, 29th Int. Sympo. Supercond., 2015/11/17 (招待)

神代暁, 超伝導検出器多画素読み出しのためのマルチプレクシング技術とマイクロ波多重読出法に関する展望, 学術振興会 186 委員会研究会, 2015/07/28 (招待)

E. Hirayama, et al., Low Temperature Characterization of NbN Resonators for Microwave SQUID Multiplexer, 15th Int. Supercond. Electron. Conf., 2015/07/07 (招待)

等

〔図書〕(計 1 件)

神代暁, 日本原子力学会誌 60 巻 7 号, 2018, 印刷中

〔産業財産権〕

出願状況 (計 2 件)

名称: 周波数多重読出装置及びその設計方法
発明者: 平山文紀, 中島裕貴, 神代暁, 山森弘毅

権利者: 産業技術総合研究所

種類: 特許

番号: 特願 2017-100717

出願年月日: 2017 年 5 月 22 日

国内外の別: 国内

名称: 周波数多重読出装置

発明者: 神代暁, 平山文紀, 山森弘毅, 福田大治, 佐藤昭, 永沢秀一, 佐藤泰

権利者: 産業技術総合研究所

種類: 特許

番号: 特願 2015-148140, 特開 2017-028635

出願年月日: 2015 年 7 月 27 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

プレス発表 光子・粒子・電磁波用超伝導検出器の画素数を飛躍的に増大する読出回路 -新回路で、小型・低消費電力・廉価な汎用型高性能計測器の実現へ-

http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr

2018/pr20180201/pr20180201.html

産総研ナノエレクトロニクス研究部門超伝導計測信号処理グループホームページ

<https://unit.aist.go.jp/neri/sscg/ja/index.html>

産総研共用施設 Clean Room for Analog digital superconductIVITY ホームページ

<https://unit.aist.go.jp/neri/cravity/ja/index.html>

1

産総研研究者紹介ビデオ 神代 暁

<https://www.youtube.com/watch?v=JT2Eq23iotU&t=1s>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

神代 暁 (KOHJIRO Satoshi)

産業技術総合研究所・エレクトロニクス製造領域・研究グループ付

研究者番号: 60356962

(2)研究分担者

山森 弘毅 (YAMAMORI Hirotake)

産業技術総合研究所・エレクトロニクス製造領域・研究グループ長

研究者番号: 00358293

平山 文紀 (HIRAYAMA Fuminori)

産業技術総合研究所・エレクトロニクス製造領域・主任研究員

研究者番号: 10357866

佐藤 昭 (SATO Akira)

産業技術総合研究所・エレクトロニクス製造領域・主任研究員

研究者番号: 30357149

永沢 秀一 (NAGASAWA Shyuichi)

産業技術総合研究所・エレクトロニクス製造領域・招聘研究員

研究者番号: 50500584

福田 大治 (FUKUDA Daiji)

産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究グループ長

研究者番号: 90312991

佐藤 泰 (SATO Yasushi)

産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員

研究者番号: 90357153

大野 雅史 (OHNO Masafumi)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号: 90391896

以上