

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H06092

研究課題名（和文）単一細胞内タンパク質のイメージング質量分析を実現する撮像型分子検出器

研究課題名（英文）Development of the molecular detector for the imaging mass spectrometry of proteins in a cell

研究代表者

全 伸幸（Zen, Nobuyuki）

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・主任研究員

研究者番号：20455439

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）：本研究は、分子が入射した位置を決定できる超高感度な撮像型の分子検出器を開発することを目的として開始した。超伝導ストリップ粒子検出器（SSPD: Superconducting Strip Particle Detector）は超伝導ストリップ線で構成される超高感度な分子検出器である。本研究によって、分子が衝突した際に超伝導ストリップ線の両端から正・負極一対の電流パルスが出力されることを実証することができ、位置分解能を有するSSPDが実現可能であることの基本原則を証明することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

SSPDが分子撮像可能であることの証明は世界初の成果であるが、分子イメージングを取得するまでには至らなかった。その理由を突き詰めれば、分子が衝突したときに超伝導体内部で起きている、電子やフォノンを巻き込んだ微視的な相互作用が十分に解明されていない現状にある。本研究で得たその認識の下、フォノンを自在に改変できるフォノン工学の手法を用いて、SSPDの素材である金属ニオブ中の電子-フォノン相互作用を垣間見ようとしたところ、通常の金属ニオブでは有り得ない電子間相互作用が起きていることを発見した。この新発見は、ドープメントを必要とせずに材料を改変できる新事実を顕に示しており、新たな学術分野を切り拓く。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study is the development of the ultra-high sensitive molecular detector for the imaging mass spectrometry, which enables to determine the position on which an irradiated molecule lands. The superconducting strip particle detector (SSPD) is a high-sensitive molecular detector which consists of a superconducting strip line. This study has successfully demonstrated that the irradiated bio-molecule triggers the emission of the positive and negative current pulses from the both ends of the superconducting strip line, respectively; that is, the position-sensitive SSPD is possible.

研究分野：超伝導デバイス、超伝導検出器、フォノン工学

キーワード：超伝導検出器 超伝導ストリップ SSPD 単一磁束量子回路 SFQ 質量分析 分子検出 光子検出

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

イメージング質量分析は、質量差によって識別された分子ごとの分布画像を得ることができる次世代の計測技術である。しかしながら、計測可能な分子量と解像度は分子検出器の性能で制限されている。

我々は、超高感度な分子検出器である超伝導ストリップ粒子検出器 (SSPD: Superconducting Strip Particle Detector) を開発し、ヒト抗体 (分子量約 15 万) などの重いタンパク質の超高感度質量分析を世界で初めて実現している (引用文献 - )。SSPD は線幅 1  $\mu\text{m}$  程度の超伝導ストリップ線をつづら折り形状に加工したものであり、現在のところ世界最大である 2 ミリサイズの SSPD を実現している (引用文献 )。細長い超伝導ストリップ線に、超伝導状態が破壊されない程度の大きさのバイアス電流を印加しておくことで、超伝導ストリップ線に分子や光子が衝突したときにナノ秒程度の高速電流パルスが発生するが、その高速電流パルスを粒子検出信号として利用するのが SSPD の動作原理である。ここで、超伝導は電子対の束縛エネルギーが meV 程度で小さく、極微弱な外的要因であっても SSPD は容易に電流パルスを発生する。その超高感度性が SSPD の最大の特徴である。しかしながら従来の SSPD は粒子が入射した位置までを特定することはできず、すなわち位置分解能を有していなかった。

### 2. 研究の目的

本研究は、分子が入射した位置を決定できる超高感度な撮像型の分子検出器を開発することを目的として開始した。SSPD を構成する超伝導ストリップ線をマイクロストリップ伝送線路として設計し、単一分子が衝突した際に超伝導ストリップ線の両端から出力される正・負極一対の電流パルスを取得する。それらの電流パルスが、超伝導ストリップ線の両端に接続された時間デジタル変換器 (TDC: Time-to-Digital Converter) に到達する時間差を取得することで、分子が衝突した位置を決定できる。このような撮像型 SSPD は、超伝導ストリップ線が分子検出面と電流パルス伝送線路を兼ねており、検出感度は犠牲にならない。すなわち位置分解能を有する超高感度な分子検出器を開発できる。

### 3. 研究の方法

マイクロストリップ伝送線路として設計した SSPD を、i 線リソグラフィ等の手段を用いて超伝導デバイス専用クリーンルームで作製する。作製した SSPD を、分子照射装置である飛行時間型質量分析装置 (TOF-MS) の分子検出部に搭載し、SSPD 両端に接続された室温動作の TDC で出力パルスの到達時間差を計測する。検出実験に用いた分子はリゾチーム (分子量約 1 万 4 千) および免疫グロブリン G (分子量約 15 万) であり、TOF-MS のイオン化部で価数が +1 ~ +4 にイオン化され、+20 ~ +25 kV の高速高電圧パルスを印加することで、検出部に設置している SSPD に向けて飛行される。高電圧パルスを印加してから SSPD が電流パルスを出力するまでの時間、すなわち分子の飛行時間 (TOF) を計測することで分子の質量を得ることができる。

### 4. 研究成果

まず、超伝導ストリップ線方向の力学インダクタンス  $L$  と、誘電体層のキャパシタンス  $C$  をパラメータとして、最終目標の画素数に相当する 2500 段だけ直列に接続したシミュレーションを実施し、実現すべき撮像型 SSPD の構造を明らかにした。

図 1 (a) が撮像型 SSPD の模式図である。分子が衝突したとき、超伝導ストリップ中を正・負極一対の電流パルスが伝搬し、最終的に撮像型 SSPD の両端に接続された室温動作の TDC に入力される。TDC で計測されたパルス到達時間差から、分子が超伝導ストリップに衝突した位置を決定することができる。

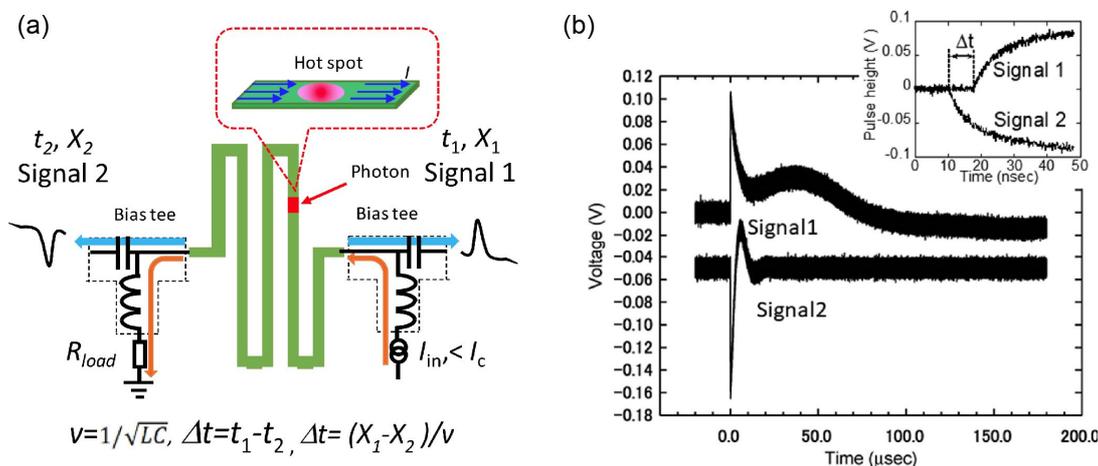


図 1 (a) 撮像型 SSPD の模式図。(b) 撮像型 SSPD でリゾチーム 1 分子を検出したときの出力信号。分子の入射位置に応じて SSPD の出力信号に時間差が生じる (挿図)。

次に、シミュレーション結果に基づいて撮像型 SSPD を作製し、TOF-MS 検出部に搭載してリゾチーム分子の検出実験を実施した。図 1 (b) が、実際にリゾチーム 1 分子を検出したときの撮像型 SSPD の出力信号である。本研究の目的どおり、撮像型 SSPD が正・負極一対の電流パルスを出力していることが分かる。この場合の電流パルス到達時間差  $\Delta t$  は約 10 ナノ秒であり、TDC で十分に時間差を計測できる程度に電流パルスを遅延させることができている。

このようにして、分子が衝突した際に超伝導ストリップ両端から正・負極一対の電流パルスが出力されるという基本原理を世界で初めて実証した (引用文献)。しかしながら、位置分解能を評価できるほど大きな S/N 比を得られていないことが分かった。

そこで、出力信号の S/N 比を向上させるべく、SSPD の特性を追究した。まず、以前から問題視されていた、SSPD 内部でのバイアス電流再分配問題の解決を試みた。TOF-MS の分子ビーム径に見合った検出面積の SSPD を実現するため、複数の超伝導ストリップ線を並列に接続しているが、各ストリップ線の電気抵抗がゼロであるため、バイアス電流を制御することができない。すなわち、超伝導ストリップ線に分子が衝突する度に、超伝導ストリップ線を通るバイアス電流が変化してしまい、結果的に SSPD の S/N 比が劣化してしまう。

本研究では、図 2 (a) のように、各ストリップのバイアス電流供給ラインに、独立に  $5 \Omega$  程度の抵抗器を設置することで問題の解決を試みた。このような実装基板を用いることで、分子衝突によって減じたバイアス電流を、一定の短時間の後に自動的に回復させることができる。図 2 (b) は、改善された実装基板を用いる前後での免疫グロブリン G (IgG) の TOF スペクトルである。バイアス電流再分配の問題を解決することで、従来は S/N 比が悪く観測不可能であった  $4\text{IgG}^+$  (4 量体) を観測することができ、また、本来は最もスペクトル強度が高くなるべき  $\text{IgG}^+$  を正しく計測できていることが分かる (青)。図 2 (c) は、バイアス電流再分配の問題を改善する前後での、リゾチーム分子計数率のバイアス電流依存性である。改善前 (赤) は、バイアス電流が 40 mA を超えると SSPD が熱暴走を起こしてしまい、それ以上にバイアス電流を印加することができず、検出効率は制限されていた。熱暴走の原因は、バイアス電流の再分配によって、ある超伝導ストリップに異常に電流が蓄積されてしまい、安易に超伝導-常伝導転移することで大きな常伝導抵抗が発生するためである。生じた常伝導抵抗は、バイアス電流とともにジュール発熱し、結果的に SSPD は分子検出不能状態に陥る。一方、バイアス電流再分配の問題を改善した後 (青) は、160 mA を超えるバイアス電流であっても熱暴走せず、220 mA 程度のバイアス電流まで SSPD は安定に動作する。この 160 ~ 220 mA のバイアス電流領域では、分子計数率がバイアス電流の大きさに依存しない結果に成っており、これは SSPD の検出効率が 100% に到達したことを意味している。それ以上のバイアス電流では、熱輻射の検出を反映した暗計数が増え始める。

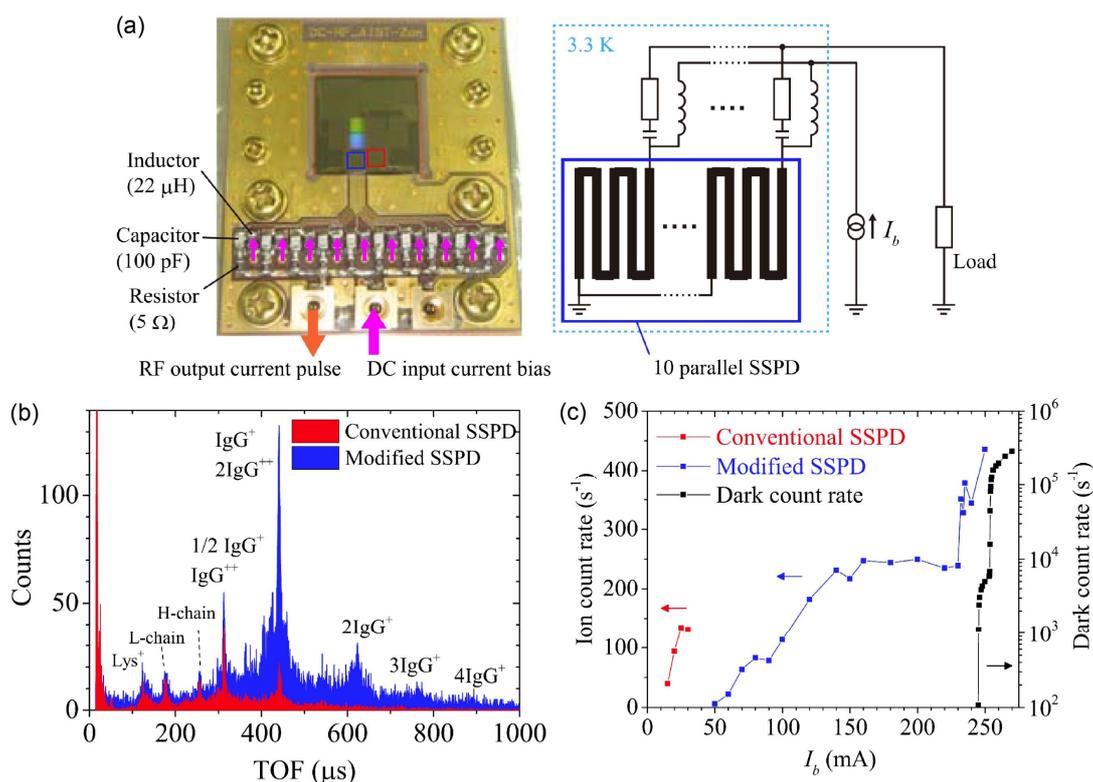


図 2 (a) SSPD バイアス電流の再分配問題を改善した検出器実装写真と等価回路。(b) 免疫グロブリン G (IgG) の質量スペクトル (赤: バイアス電流再分配問題改善前、青: 改善後)。(c) 分子計数率のバイアス電流依存性。計数率がフラットになるバイアス領域 (検出効率 100%) が確認できる (青)。より大きなバイアス電流で暗計数率が増加する (黒)。

また、将来的に SSPD を社会普及させるためには、より大きな検出面積が必要であり、現状の 2 ミリサイズの SSPD を多素子化しなくてはならない。しかしながら、SSPD が動作する低温環境 (3 K) から、SSPD 素子数に応じた伝送ケーブルを室温動作の TDC まで接続すると、それらのケーブルを介して室温から冷凍機内へ多量の熱が流入してしまい、SSPD の特性が損なわれる。そこで、本研究では、SSPD と同じ低温環境で動作可能な、超伝導単一磁束量子 (SFQ: Single Flux Quantum) で構成された TDC を用いることで問題の解決を試みた。SFQ は複数の超伝導リングで構成され、量子化磁束が超伝導リング中を伝搬することで演算を行う。SFQ-TDC はバイナリカウンタであり、パルスが入力されるまでに要した時間を記録することができる。すなわち、室温動作の TDC と同様に、SSPD の両端に SFQ-TDC を接続することで、粒子衝突によって生じるパルス電流の到達時間差を計測することができ、粒子が衝突した位置を決定することができる。SFQ-TDC の時間分解能は 2.5 ps であり、SSPD が出力するナノ秒程度の電流パルスを十分に検出可能である (引用文献 - )。

検出効率、応答速度、および多素子化可能な素子数の観点で理想的な構成は、SSPD と SFQ-TDC がオンチップで接続されたデバイスである。しかしここでも、SSPD と SFQ-TDC のそれぞれに印加するバイアス電流をどう分配すればよいかの問題があった。これまでの超伝導ストリップ線の物性値は理論値を基に求めており、特に磁場侵入長が大きい場合、SSPD と SFQ-TDC のそれぞれに印加するバイアス電流を分離するためには、SSPD と SFQ-TDC の間に抵抗器を挿入しておく必要があった。しかしこの抵抗器は想定外の磁束の侵入を許し、また、デバイス動作に悪影響を及ぼすジョンソンノイズの要因でもある。本研究で、線幅の異なる様々な超伝導ストリップ線の磁場下における抵抗温度特性やホール係数を精査したところ、我々の超伝導ストリップ線の磁場侵入長は理論値よりも一桁小さいことが判明した (図 4 (a))。この場合、SSPD と SFQ-TDC の間に抵抗器を設置しなくとも、SSPD に印加するバイアス電流が SFQ-TDC 側に流れ込むことはなく、SSPD と SFQ-TDC を直接的に接続することが許される (図 4 (b))。すなわち本研究で、SSPD と SFQ-TDC で構成される安定動作のモノリシック粒子検出デバイスを実現する指針を見出すことができた。図 4 (c)は、当該指針に基づき設計された SSPD-SFQ モノリシック粒子検出デバイスの i 線パターンであり、将来的な SSPD の多素子化に向けた研究展開に弾みを付けることができた。

また、SSPD は分子だけではなく、光子に対しても優れた検出感度を有している。本研究で得られた、SSPD と SFQ をモノリシックに組み込むためのこれらの知見は、単一光子検出器に係る特許が米国、欧州、中国で登録される際に活用された (引用文献 )。当該技術は、量子暗号通信の分野で今後に威力を発揮する。

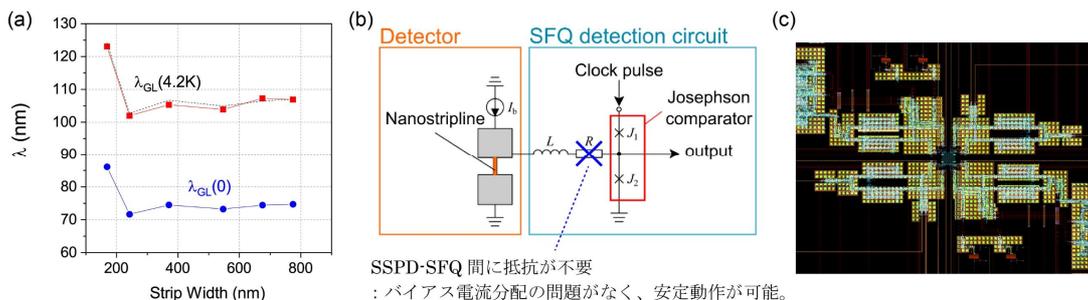


図 3 (a) 超伝導ストリップの物性値 (磁場侵入長) を調査した結果。 (b) SSPD と SFQ 間のバイアス電流の分配問題を解消するために必要であった抵抗器が不要になることを示す回路図。 (c) SSPD-SFQ モノリシック粒子検出デバイスの i 線リソグラフィ用レチクル。

本研究は、分子が入射した位置を決定できる超高感度な撮像型の分子検出器を開発することを目的として開始した。SSPD は超伝導ストリップ線で構成される超高感度な分子検出器である。本研究によって、分子が衝突した際に超伝導ストリップ線の両端から正・負極一対の電流パルスが出力されることを実証することができ、位置分解能を有する SSPD が実現可能であることの基本原理を証明することができた。

SSPD が分子撮像可能であることの証明は世界初の成果であるが、実際に分子イメージングを取得するまでには至らなかった。その理由を突き詰めれば、分子が衝突したときに超伝導体内部で起きている、電子やフォノンを巻き込んだ微視的な相互作用が十分に解明されていない現状にある。本研究で得たその認識の下、フォノンを自在に改変できるフォノン工学の手法を用いて、SSPD の素材である金属ニオブ中の電子-フォノン相互作用を垣間見ようとしたところ、通常の金属ニオブでは有り得ない電子間相互作用が起きていることを発見した (引用文献 )。この新発見は、ドーパントを必要とせずに材料を改変できる新事実を顕に示しており、新たな学術分野を切り拓く成果である。

<引用文献>

N. Zen, A. Casaburi, S. Shiki, K. Suzuki, M. Ejrnaes, R. Cristiano, M. Ohkubo, "1 mm ultrafast superconducting stripline molecule detector", *Appl. Phys. Lett.* **95**, 172508 (2009).

Angel E. Velasco, Daniel P. Cunnane, Simone Frasca, Thomas Melbourne, Narendra Acharya, Ryan Briggs, Andrew D. Beyer, Matthew D. Shaw, Boris S. Karasik, Matthias A. Wolak, Varun B. Verma, Adriana E. Lita, Hiroyuki Shibata, Masataka Ohkubo, Nobuyuki Zen, Masahiro Ukibe, Xiaoxing Xi, Francesco Marsili, "High-operating-temperature superconducting nanowire single photon detectors based on magnesium diboride", *2017 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*.

A. Casaburi, R. M. Heath, R. Cristiano, M. Ejrnaes, N. Zen, M. Ohkubo, R. H. Hadfield, "Integrated Joule switches for the control of current dynamics in parallel superconducting strips", *Supercond. Sci. Technol.* **31**, 06LT01 (2018).

Nobuyuki Zen, Shigetomo Shiki, Masahiro Ukibe, Masaki Koike, Masataka Ohkubo, "Ion-induced dynamical change of supercurrent flow in superconducting strip ion detectors with parallel configuration", *Appl. Phys. Lett.* **104**, 012601 (2014).

Chiharu Watanabe, Masahiro Ukibe, Nobuyuki Zen, Go Fujii, Kazumasa Makise, Masataka Ohkubo, Te-Hui Lee, Di-Jing Huang, "Development of Superconducting Nanostrip X-Ray Detector for High-Resolution Resonant Inelastic Soft X-Ray Scattering (RIXS)", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **29**, 2400104 (2019).

Kyosuke Sano, Tomoki Shimoda, Yutaka Abe, Yuki Yamanashi, Nobuyuki Yoshikawa, Nobuyuki Zen, Masataka Ohkubo, "Reduction of the supply current of single-fluxquantum time-to-digital converters by current recycling techniques", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **27** (2016).

吉川 信行、佐野 京佑、山梨 裕希、全 伸幸、大久保 雅隆、"超伝導デジタル回路による生体高分子用超伝導飛行時間型質量分析計"、*低温工学* **52**, 349-354 (2017).

Yuma Tomitsuka, Yuki Yamanashi, Nobuyuki Zen, Masataka Ohkubo, Nobuyuki Yoshikawa, "Demonstration of Picosecond Time Resolution in Double-Oscillator Time-to-Digital Converter Using Single-Flux-Quantum Circuits", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **29**, 1301505 (2019).

Nobuyuki Zen, Yasunori Mawatari, Go Fujii, Nobuyuki Yoshikawa, "PHOTON DETECTION DEVICE AND PHOTON DETECTION METHOD", *JP6528042, US10605655 B2, EPC16811642.4, CN201680035554.2* (2019–2020).

Nobuyuki Zen, "Phonon-engineered Nb film as a Mott-insulating tunnel-junction network", *AIP Adv.* **9**, 095023 (2019).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Sano Kyosuke, Shimoda Tomoki, Abe Yutaka, Yamanashi Yuki, Yoshikawa Nobuyuki, Zen Nobuyuki, Ohkubo Masataka	4. 巻 27
2. 論文標題 Reduction of the supply current of single-flux-quantum time-to-digital converters by current recycling techniques	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2016.2646916	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Angel E. Velasco, Daniel P. Cunnane, Simone Frasca, Thomas Melbourne, Narendra Acharya, Ryan Briggs, Andrew D. Beyer, Matthew D. Shaw, Boris S. Karasik, Matthaus A. Wolak, Varun B. Verma, Adriana E. Lita, Hiroyuki Shibata, Masataka Ohkubo, Nobuyuki Zen, Masahiro Ukibe, Xiaoxing Xi, Francesco Marsili	4. 巻 -
2. 論文標題 High-operating-temperature superconducting nanowire single photon detectors based on magnesium diboride	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 YOSHIKAWA Nobuyuki, SANO Kyosuke, YAMANASHI Yuki, ZEN Nobuyuki, OHKUBO Masataka	4. 巻 52
2. 論文標題 Superconducting Time-of-flight Mass Spectrometry Systems for Biomolecules using Superconducting Digital Circuits	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 TEION KOGAKU (Journal of Cryogenics and Superconductivity Society of Japan)	6. 最初と最後の頁 349 ~ 354
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2221/jcsj.52.349	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Casaburi A, Heath R M, Cristiano R, Ejrnaes M, Zen N, Ohkubo M, Hadfield R H	4. 巻 31
2. 論文標題 Integrated Joule switches for the control of current dynamics in parallel superconducting strips	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 06LT01 ~ 06LT01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/aabcfcd	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Tomitsuka Yuma, Yamanashi Yuki, Zen Nobuyuki, Ohkubo Masataka, Yoshikawa Nobuyuki	4. 巻 29
2. 論文標題 Demonstration of Picosecond Time Resolution in Double-Oscillator Time-to-Digital Converter Using Single-Flux-Quantum Circuits	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2019.2902478	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Watanabe Chiharu, Ukibe Masahiro, Zen Nobuyuki, Fujii Go, Makise Kazumasa, Ohkubo Masataka, Lee Te-Hui, Huang Di-Jing	4. 巻 29
2. 論文標題 Development of Superconducting Nanostrip X-Ray Detector for High-Resolution Resonant Inelastic Soft X-Ray Scattering (RIXS)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2019.2903419	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Zen Nobuyuki	4. 巻 9
2. 論文標題 Phonon-engineered Nb film as a Mott-insulating tunnel-junction network	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 095023 ~ 095023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5126616	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 全 伸幸
2. 発表標題 Gbps級の量子鍵生成率を目指した超伝導ストリップ光子検出器の開発
3. 学会等名 超伝導エレクトロニクス研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kyosuke Sano, Nobuyuki Yoshikawa, Nobuyuki Zen, Masataka Ohkubo
2. 発表標題 Reduction of the supply current of single-flux-quantum time-to-digital converters by current recycling techniques for the operation in cryo-cooler
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Masataka Ohkubo, Hasahiro Ukibe, Shigetomo Shiki, Nobuyuki Zen, Go Fujii
2. 発表標題 System Integration of Superconducting Tunnel Junction Detectors for Measurement of Unrevealed Material Information
3. 学会等名 16th International Superconductive Electronics Conference (ISEC2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Alessandro Casaburi, Masataka Ohkubo, Nobuyuki Zen
2. 発表標題 Integrated Superconducting/resistive switches for magnetic flux control in parallel design superconducting strip-line detectors
3. 学会等名 16th International Superconductive Electronics Conference (ISEC 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masataka Ohkubo, Shigetomo Shiki, Go Fujii, Nobuyuki Zen, Masahiro Ukibe
2. 発表標題 Extreme spectral and spatial resolution of superconducting detectors for analytical instrumentation
3. 学会等名 International Workshop on Superconducting Quantum Technology (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nobuyuki Zen, Yutaka Abe, Go Fujii, Yuma Tomitsuka, Yuki Yamanashi, Yasunori Mawatari, Nobuyuki Yoshikawa
2. 発表標題 Study for the Operating Principle of Superconducting Strip Photon Detectors (SSPDs)
3. 学会等名 17th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD17) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 全 伸幸、藤井 剛、馬渡 康徳、浮辺 雅宏、阿部 裕、冨塚 裕真、吉川 信行
2. 発表標題 Gbps級の量子鍵生成率を目指した超伝導単一光子検出器の開発
3. 学会等名 第三回量子技術イノベーションコアWorkshop
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 全 伸幸、馬渡 康徳、藤井 剛、阿部 裕、冨塚 裕真、吉川 信行
2. 発表標題 渦糸の直接捕捉による超高速超伝導ストリップ光子検出器の開発
3. 学会等名 第25回渦糸物理国内会議
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡邊千春、全伸幸、藤井剛、牧瀬圭正、浮辺雅宏、大久保雅隆
2. 発表標題 1D-時間遅延線型超伝導ナノストリップX線イメージング検出器 の開発
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuma Tomitsuka, Yutaka Abe, Nobuyuki Zen, Yuki Yamanashi, Masataka Ohkubo, Nobuyuki Yoshikawa
2. 発表標題 Demonstration of picosecond time resolution of double-oscillator time-to-digital converters using single-flux-quantum circuits
3. 学会等名 30th International Symposium on Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nobuyuki Zen, Yutaka Abe, Go Fujii, Yuma Tomitsuka, Yuki Yamanashi, Yasunori Mawatari, Nobuyuki Yoshikawa
2. 発表標題 Study for the Operating Principle of Superconducting Strip Photon Detectors (SSPDs)
3. 学会等名 30th International Symposium on Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡邊千春、全伸幸、藤井剛、牧瀬圭正、浮辺雅宏、大久保雅隆
2. 発表標題 1D-時間遅延線型超伝導ナノストリップX線イメージング検出器 の開発
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masataka Ohkubo, Shigetomo Shiki, Go Fujii, Chiharu Watanabe, Nobuyuki Zen, Masahiro Ukibe
2. 発表標題 Superconductor detectors overcoming the limits in conventional analytical instruments
3. 学会等名 International Workshop for Superconducting Sensors and Detectors 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masahiro Ukibe, Chiharu Watanabe, Nobuyuki Zen, Go Fujii, Kazumasa Makise, Masataka Ohkubo
2. 発表標題 Development of superconducting nanostripline X-ray detector for high-resolution resonant inelastic soft X-ray scattering (RIXS)
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計3件

産業財産権の名称 PHOTON DETECTION DEVICE AND PHOTON DETECTION METHOD	発明者 Zen Nobuyuki et al.	権利者 国立研究開発法人産業技術総合研究所
産業財産権の種類、番号 特許、CN201680035554.2	取得年 2020年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 PHOTON DETECTION DEVICE AND PHOTON DETECTION METHOD	発明者 Zen Nobuyuki et al.	権利者 国立研究開発法人産業技術総合研究所
産業財産権の種類、番号 特許、EPC16811642.4	取得年 2020年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 PHOTON DETECTION DEVICE AND PHOTON DETECTION METHOD	発明者 Zen Nobuyuki et al.	権利者 国立研究開発法人産業技術総合研究所
産業財産権の種類、番号 特許、US10605655 B2	取得年 2020年	国内・外国の別 外国

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	吉川 信行  (Yoshikawa Nobuyuki)		
研究協力者	佐野 京佑  (Sano Kyosuke)		

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	阿部 裕 (Abe Yutaka)		
研究協力者	富塚 裕真 (Tomitsuka Yuma)		
研究協力者	渡邊 千春 (Watanabe Chiharu)		
研究協力者	馬渡 康德 (Mawatari Yasunori)		
研究協力者	大久保 雅隆 (Ohkubo Masataka)		