

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2018～2022

課題番号：18H05245

研究課題名（和文）超伝導シングルフォトンカメラによる革新的イメージング技術の創出

研究課題名（英文）Development of new imaging technology based on superconducting single-photon camera

研究代表者

寺井 弘高 (Terai, Hirotaka)

国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所神戸フロンティア研究センター・室長

研究者番号：10359094

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 149,400,000円

研究成果の概要（和文）：超伝導ナノワイヤ単一光子検出器（SSPD）イメージングアレイの実現を目指し、32x32ピクセルSSPDアレイの作製プロセス、冷凍機実装技術を開発した。超伝導単一磁束量子（SFQ）論理回路や断熱量子磁束パラメトロンによる極低温信号処理技術を導入し、光子を検出したピクセルの位置情報を2本の同軸ケーブルを使って80 ps以下という時間精度で読み出すことができることを実証した。また、SSPDアレイとSFQ信号処理回路のモノリシック集積化プロセスを開発し、SSPDの将来的な大規模アレイ化に先鞭をつけた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

SSPDは紫外から中赤外という幅広い波長領域に感度を持ち、高感度、低雑音、低ジッタな光子検出器として量子情報通信や先端計測分野で広く利用されている。SSPDのアレイ化により、高感度イメージセンサの実現だけでなく、さらなる大面積化・高速化、光子数識別が可能となるが、信号の読出しを含めた冷凍機実装に課題があった。本研究で取り組んだ極低温環境での信号処理技術の導入によりSSPDアレイの小型冷凍機への実装技術が大きく進展し、バイオ、医療、量子、宇宙等、幅広い分野で最先端の研究開発を支える不可欠なツールとしてのSSPDアレイシステムの実現が見えてきた。

研究成果の概要（英文）：We have developed fabrication process and implementation technique in refrigerator to realize superconducting nanowire single-photon detector (SSPD) imaging array. We introduced cryogenic signal processing technology using superconducting single-flux-quantum (SFQ) circuit and adiabatic quantum-flux-parametron and successfully demonstrated the readout of spatial information of the photon detection using two readout cables with a timing jitter below 80 ps. We also developed a monolithic integration process of SSPD arrays and SFQ signal processing circuits and pioneered the future large-scale SSPD array.

研究分野：低温エレクトロニクス

キーワード：超伝導ナノワイヤ単一光子検出器 単一磁束量子論理回路 断熱量子磁束パラメトロン 高感度イメージセンサ 極低温信号処理

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

光子検出器の応用範囲は広く、蛍光測定、臨床検査装置、量子暗号通信、量子光学実験、半導体欠陥診断、地球環境計測、高エネルギー物理学等、多岐にわたっている。現在、光電子増倍管 (PMT) やアバランシェフォトダイオード (APD) が広く利用されているが、2次元または1次元のアレイ素子として実現している規模は固体素子である APD でも数千ピクセル程度である。高い空間分解能を追及するのであれば、冷却 EM-CCD も光子計数可能な高い感度を持つが、フレームレートが遅く、高い時間分解能での光子検出はできない。また、APD や PMT の性能を上回る光子検出器として超伝導現象を利用した超伝導転移端センサ (TES) やマイクロ波カイネティックインダクタンス検出器 (MKID) があり、宇宙観測 (X線天文、宇宙マイクロ波背景放射の観測)、材料分析、放射線計測への応用が進んでいるが、これまでに実現しているアレイ規模は千ピクセル程度であり、時間分解能も TES でナノ秒、MKID でマイクロ秒オーダーと、決して優れているとは言えない。高い検出感度、低ノイズ、高い空間分解能 (1万ピクセル以上)、時間分解能 (50 ps 以下) を兼ね備えた究極の光子検出技術をどのように実現するのかという「問い」に対して、我々は超伝導ナノワイヤ単一光子検出器 (SSPD) と呼ばれる検出器に着目している。

SSPD は紫外～中赤外に感度を持ち、その検出効率は通信波長帯 (1550 nm) で 90% を超え、室温からの黒体放射を遮蔽すれば、1 cps 以下の暗計数率で動作する。また、20 ps 以下のジッタ報告事例もあり、その時間分解能は非常に高い。近赤外領域での優れた性能から、SSPD はすでに量子情報分野で広く利用されており、最近ではさらなる高速化、大面積化、高機能化 (光子数識別、イメージング等) を目指した多ピクセル化に注目が集まっている。

## 2. 研究の目的

本研究では、超伝導単一磁束量子 (SFQ) 論理回路を用いた極低温信号処理技術を最大限に活用し、超伝導シングルフォトンカメラとも呼ぶべき大規模の SSPD イメージングアレイの実現を目指す。SSPD の大規模アレイ化を実現する上で、最大のボトルネックは信号の読み出しである。ピクセル数の増加に伴い、信号の読み出しに必要なケーブル数が増大し、冷凍機への熱流入が深刻化するからである。米国 NIST (国立標準技術研究所) のグループは、 $N \times N$  アレイの行と列それぞれから合計  $2N$  本の配線で信号を読み出す行列読み出し手法を提案し、 $8 \times 8$  ピクセル SSPD アレイの動作実証に成功しているが、この手法を  $100 \times 100$  ピクセル規模にまで拡張することは、200 本の読み出しケーブルによる冷凍機への熱負荷から困難と考えられる。我々は、この行列読み出し手法に情報通信研究機構 (NICT) がこれまで多くの基盤技術を蓄積してきた SFQ 回路、さらには横浜国立大学で研究開発を進めている SFQ 回路よりもさらに消費電力が 2 桁小さい断熱型磁束量子パラメトロン (AQFP) 回路による極低温信号処理を導入することで、 $100 \times 100$  ピクセル規模の SSPD アレイが実現できると考えた。行と列からの信号は SFQ 回路によりアドレス情報をデジタルコード化して、2 本のケーブルを用いて冷凍機から取り出すことで、ピクセル数が増えても、2 本のケーブルで信号を読み出すことができ、スケラビリティに優れている。

SFQ 回路を用いた極低温信号処理は NICT が世界をリードしてきた独自技術であり、また、横浜国立大学は AQFP 回路の研究開発で世界をリードしている。産業技術総合研究所 (AIST) が保有する高度な超伝導回路作製プロセスも日本が優位性を持っている分野であり、このような日本が強みを持つ極低温信号処理技術と NICT の高度な SSPD 作製技術を組み合わせ、深紫外～中赤外という広い波長帯域で、究極の感度と低ノイズ、高い空間・時間分解能を兼ね備えた夢のカメラの実現を目指す。

## 3. 研究の方法

SSPD アレイの設計・作製・評価については、NICT 未来 ICT 研究所内で実施する。デジタル信号処理回路の開発については、SFQ 信号処理回路の設計・評価は NICT、AQFP 信号処理回路の設計・評価は横浜国立大学が担当し、回路の作製は AIST ナノエレクトロニクス研究部門が担当する。光空間入力系の構築については、電気通信大学と NICT で情報共有しながら開発する。SSPD アレイの応用が期待される光子分光計測技術について、電気通信大学を中心に SSPD を用いた量子的なフーリエ操作による量子もつれ光子のスペクトル操作等、SSPD アレイによる周波数自由度を利用した量子情報技術の高機能化に向けた検討を行う。

SSPD アレイ作製については、作製歩留まりの改善と多層配線プロセスの確立が目標となる。抵抗体やナノワイヤの特性均一性を含めて、作製歩留まりの改善が必要であり、成膜、リソグラフィ、エッチングの各工程におけるパーティクル、レジスト残渣の低減が重要と考えている。パーティクル発生の主要因と考えられる絶縁膜の形成プロセス、電子線リソグラフィプロセス、レジスト除去後のウェハ洗浄工程の最適化により作製歩留まりの改善を目指す。

大規模 SSPD アレイではバイアス電流を一括供給するため、超伝導臨界電流の著しく低いナノワイヤがあると、他のピクセルに十分なバイアスを供給できず、高い検出効率が得られないことが懸念される。我々は、SNAP と呼ばれる 2 並列のナノワイヤを用いることで、高い検出効率が得られるバイアスマージンを拡大できることを実証しており、ナノワイヤの特性のばらつきによる問題が顕在化した場合は、SNAP のアレイ化を検討する予定である。

SFQ 回路では回路の大規模化に伴いバイアス電流量が増大するため、 $100 \times 100$  ピクセル規模の SSPD アレイでは、回路やケーブルで発生するジュール熱による冷凍機ステージ温度の上昇が懸念される。本研究では、このような冷凍機内部でのジュール熱の低減に加えて、SFQ 回路よりも

さらに2桁以上少ないバイアス電流で駆動できるAQFP回路を用いた信号処理についても研究開発を進める。ただし、AQFP回路は交流バイアス電流駆動であり、SSPDからの信号を変換する際、交流バイアスの周期で時間情報が量子化されてしまうため、光子検出の時間情報の読み出しには、引き続きSFQ回路による信号処理が必要と考えている。100x100ピクセル規模のエンコーダ回路をSFQ回路による時間情報の処理とAQFP回路によるアドレスエンコードを併用して実現できると考えている。また、SSPDアレイのピクセル数が増大した場合には、SSPDアレイと信号処理回路を接続する配線数が増大し実装が一層困難になることが予想される。そのため、SSPDアレイと信号処理回路を同一基板上に集積化するモノリシック集積化についても検討を進めていく予定である。

#### 4. 研究成果

図1に示す行列読み出し方式と極低温信号処理を組み合わせた我々のアプローチについて、4x4ピクセル行列読み出し方式SSPDアレイをSFQエンコーダと組み合わせて原理実証を行った。この実証実験では、15x15 $\mu\text{m}^2$ のピクセルサイズに対して、受光エリア(ナノワイヤエリア)を5x10 $\mu\text{m}^2$ とし、フィリングファクタは22%程度とした。SFQエンコーダ回路は、光子検出信号が入力された時のみ回路内部でクロック信号を生成してデジタル信号を出力するイベント駆動型とし、NICTで設計した回路を産総研(AIST) Nb 2.5 kA/cm<sup>2</sup>標準プロセスを用いて作製した。

図2にSFQエンコーダを用いた行列読み出し方式4x4ピクセルSSPDアレイのチップ実装写真を示す。SSPDチップ、SFQチップの他に、バイアス供給と列読み出し配線の終端用に大きなインダクタンスが必要で、占有面積の大きな薄膜インダクタンスを作製したチップをバイアス供給用と列読み出し終端用にそれぞれ1チップずつ実装している。4x4SSPDアレイをSFQエンコーダと接続してテストした結果を図3に示す。光子を検出したことを示すビット出力に引き続き、4x4のすべての出力に対してアドレス情報が正常にバイナリコードにエンコードされ出力されていることが確認され、行列読み出し方式のSSPDアレイから、2本の同軸ケーブルで、光子検出の時間情報、位置情報を室温環境に取り出すことに成功した。この成果は、SFQ回路による極低温信号処理により、ピクセル数が増大しても2本のケーブルで光子を検出した位置情報や時間情報まで読み出すことができる方式として、国内外で大きな注目を集め、ISECやISSといった複数の国際会議で招待講演を行った。読み出し時間精度についても評価を行っており、すべてのピクセルで80 ps以下の読み出し時間精度を確認した(Opt. Exp. 28, 12047, 2020)。

図4に試作した32x32ピクセルSSPDアレイの顕微鏡写真を示す。試作を繰り返す中で、歩留まりの低下要因として電子線描画+現像後の電子線レジストの残渣が主要因であることが明らかとなってきた。メアンダ状にパターニングした100 nm程度のライン&スペースのギャップの一部に残渣が生じ、ナノワイヤの電気的な短絡を引き起こす。電子線のドーズ量や、現像時のウェハの向きを変更する(横向き、もしくは下向きにする)ことで残渣を低減でき、さらにはフッ

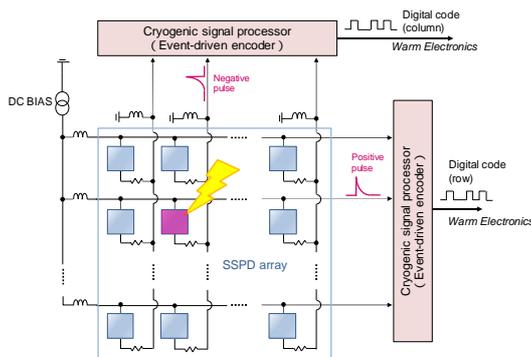


図1 行列読み出し方式と極低温信号処理を組み合わせた大規模SSPDアレイの全体構成

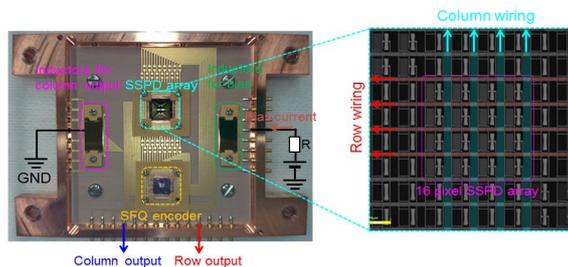


図2 SFQエンコーダを用いた行列読み出し方式4x4ピクセルSSPDアレイのチップ実装写真

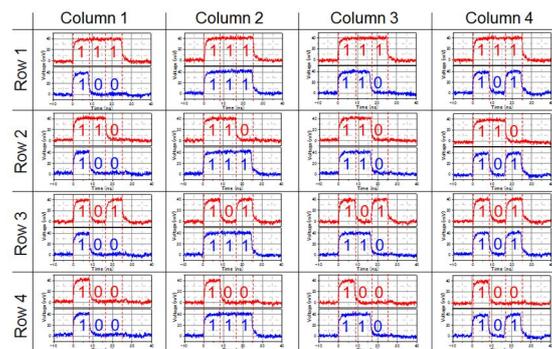


図3 SFQエンコーダを用いた行列読み出し方式4x4ピクセルSSPDアレイの出力波形

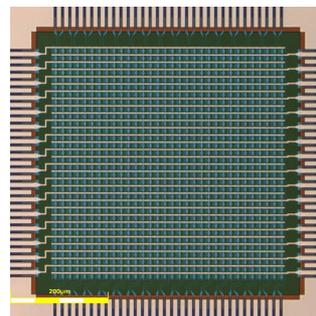


図4 32x32ピクセルSSPDアレイの顕微鏡写真



列読出し方式の32x32ピクセルSSPD についてもモノリシック集積化による試作を行った。図8にチップの顕微鏡写真を示す。このチップについては、SFQエンコーダの一部にレイアウトミスがあり、残念ながら完全動作を実証することはできなかった。現在、このレイアウトミスを修正した新たなチップを試作中で今後評価を進めていく予定である。高検出効率のSSPDの製造技術を有する機関が世界的に数多く存在する中で、極低温信号処理回路とモノリシックに集積化する技術を有しているのは国内外でも我々の研究グループだけであり、SSPDの大面積化、高速化、光子数識別、単一光子イメージングの実現に向けて、大きなアドバンテージを築くことができたと考えている。

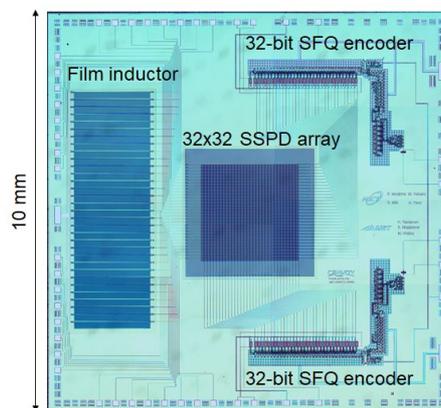


図8 SFQ エンコーダとモノリシックに集積化した 32x32 ピクセル SSPD アレイのチップ顕微鏡写真

本研究を通じてSSPDの作製歩留まりが大幅に改善したことで、16ピクセルSSPDアレイ全体で80%の検出効率を達成し、この16ピクセルSSPDアレイとSFQ多重化回路を組み合わせ、1 ns 間隔で到来する光子の検出が可能であることを実証した(Opt. Lett. 46, 6015, 2021)。通常、SSPDの出力信号は20 ns 程度の減衰時間を持ち、アレイ化するだけでは20 ns より大幅に短い間隔での時間多重読出しには対応できないが、出力信号を時間幅5 ps 程度のSFQパルスに変換し、時間多重後に時間幅0.8 ns 程度のパルス信号として読み出すことで、1 ns というSSPDの出力パルス幅よりも短い時間間隔で信号を読み出すことが可能となった。本研究で取り組んでいるSFQ回路を用いた極低温信号処理の利点が、SSPDの高速化においても有効に活用された成果と考えている。

SSPDの光子分光計測技術への応用については、光カーゲート法による光子数の変化をSSPDにより検出、フォトニック結晶ファイバに入射させるゲート光パルスと単一光子時間波束との時間差を掃引することで単一光子波束を観測するシステムを構築し、この装置を偏光多重化により2光子検出に拡張することで、光カーゲート法では世界初となる二次元空間中での量子もつれ光の時間分布計測に成功した(Opt. Exp. 30, 4999, 2022)。また、超高速光科学の基盤を支える基本概念である時間-周波数領域での光電場のフーリエ合成(光シンセシス)において、量子もつれ状態の2光子確率振幅分布を二次元の時間-周波数空間で量子的な操作を行う「量子光シンセシス」を提唱し、SSPDを用いて実証実験に取り組んだ(APL Photonics 6, 086104, 2021)。これらはSSPDを用いた時間-周波数領域での量子もつれ光観測技術を用いることで可能となった成果であり、SSPDアレイによる周波数自由度の利用により量子情報技術のさらなる高機能化につながるものと考えている。

本研究を総括すると、行列読出し方式のSSPDアレイと極低温信号処理を組み合わせ大規模SSPDアレイの実現を目指すという着想に基づき、SSPDアレイ作製プロセスにおける歩留まりの改善、SFQ回路やAQFP回路といった極低温動作が可能なロジック回路の開発を行った。4x4ピクセルSSPDアレイによる原理実証、32x32ピクセルSSPDアレイの部分動作の確認に成功し、極低温信号処理回路においては、32x32ピクセル対応のSFQエンコーダの完全動作の実証に成功した。課題であったSFQ回路への直流電流の供給についても、冷凍機内部でできるだけ接触抵抗の小さいコネクタを選定することで、400 mA という大電流を供給しても冷凍機の温度上昇を0.1 K 以下に抑制することができ、SFQ回路による極低温信号処理で100x100ピクセルにまで対応できる目途がついた。また、本研究で新たに考案したSFQ/AQFPハイブリッド読出し回路については、4ピクセルSSPDアレイと接続した実証実験に成功し、32x32ピクセルSSPDアレイ用の回路においても、回路単独の試験において正常動作を確認できた。SSPDアレイとSFQ信号処理回路のモノリシック集積化においては、SFQ回路の作製プロセスや同一チップ上で動作するSFQ回路が消費する220  $\mu$ W の電力がSSPDの動作にほぼ影響しないことを確認できたが、SFQ回路がさらに大規模化した場合のチップ温度の局所的な上昇については、今後さらに検討していく必要があると考えている。SSPDを用いた時間-周波数領域での量子もつれ光観測技術により、量子光シンセシスの実証実験に取り組み、SSPDアレイを用いた周波数自由度の利用による量子情報技術の高機能化へとつながる成果が得られた。

SSPDは紫外から中赤外という幅広い波長領域に感度を持ち、100%に迫る検出効率、低雑音、低ジッタな光子検出器として、すでに量子情報通信や先端計測分野で普及が進んでいるが、マルチピクセル化により、単一光子感度のイメージセンサだけでなく、さらなる大面積化・高速化、光子数識別機能の獲得が可能となる。本研究で取り組んだ極低温信号処理の導入により小型冷凍機への実装技術が大きく進展し、バイオ、医療、量子、宇宙等、幅広い分野で最先端の研究開発を支える不可欠なツールとしての大規模SSPDアレイシステムの実現に向けて大きく前進した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Jin Rui-Bo, Tazawa Kurumi, Asamura Naoto, Yabuno Masahiro, Miki Shigehito, China Fumihiro, Terai Hiroataka, Minoshima Kaoru, Shimizu Ryosuke	4. 巻 6
2. 論文標題 Quantum optical synthesis in 2D time-frequency space	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 APL Photonics	6. 最初と最後の頁 086104 ~ 086104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0059895	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 Miki Shigehito, Miyajima Shigeyuki, China Fumihiro, Yabuno Masahiro, Terai Hiroataka	4. 巻 46
2. 論文標題 Photon detection at 1 ns time intervals using 16-element SNSPD array with SFQ multiplexer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 6015 ~ 6018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.438416	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 NAGASAWA Shuichi, TANAKA Masamitsu, TAKEUCHI Naoki, YAMANASHI Yuki, MIYAJIMA Shigeyuki, CHINA Fumihiro, YAMAE Taiki, YAMAZAKI Koki, SOMEI Yuta, SEGA Naonori, MIZUGAKI Yoshinao, MYOREN Hiroaki, TERAJ Hiroataka, HIDAKA Mutsuo, YOSHIKAWA Nobuyuki, FUJIMAKI Akira	4. 巻 E104.C
2. 論文標題 Planarized Nb 4-Layer Fabrication Process for Superconducting Integrated Circuits and Its Fabricated Device Evaluation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 435 ~ 445
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.2020SUP0001	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 Yabuno Masahiro, Takumi Takahiro, China Fumihiro, Miki Shigehito, Terai Hiroataka, Mosley Peter J., Jin Rui-Bo, Shimizu Ryosuke	4. 巻 30
2. 論文標題 Ultrafast measurement of a single-photon wave packet using an optical Kerr gate	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 4999 ~ 5007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.446010	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 清水亮介	4. 巻 49号4巻
2. 論文標題 二次元空間中における時間 - 周波数量子もつれ光子の検出とフーリエ二重性の実証	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 206 ~ 211
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 -

1. 著者名 寺井弘高	4. 巻 33
2. 論文標題 超伝導ナノワイヤ単一光子検出器 (特集 社会を変える量子技術への期待(1))	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 光アライアンス (日本工業出版)	6. 最初と最後の頁 9-13
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 無
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 Yabuno Masahiro, Miyajima Shigeyuki, Miki Shigehito, Terai Hirota	4. 巻 28
2. 論文標題 Scalable implementation of a superconducting nanowire single-photon detector array with a superconducting digital signal processor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 12047 ~ 12057
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.388302	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 -

1. 著者名 Takeuchi Naoki, China Fumihiro, Miki Shigehito, Miyajima Shigeyuki, Yabuno Masahiro, Yoshikawa Nobuyuki, Terai Hirota	4. 巻 28
2. 論文標題 Scalable readout interface for superconducting nanowire single-photon detectors using AQFP and RSFQ logic families	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 15824 ~ 15834
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.392507	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 -

1. 著者名 China Fumihiro, Takeuchi Naoki, Miki Shigehito, Yabuno Masahiro, Miyajima Shigeyuki, Terai Hirotaka	4. 巻 34
2. 論文標題 Cryogenic readout of superconducting nanowire single-photon detectors using high-sensitivity adiabatic quantum-flux-parametron circuits	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 44003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/abe7ac	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 -

1. 著者名 寺井 弘高	4. 巻 90
2. 論文標題 超伝導ナノワイヤ単一光子検出器	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 応用物理	6. 最初と最後の頁 148 ~ 154
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11470/oubutsu.90.3_148	査読の有無 無
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 S. Miyajima, M. Yabuno, S. Miki, and H. Terai	4. 巻 vol. 29, no. 5
2. 論文標題 Single-Flux-Quantum based Event-Driven Encoder for Large-Pixel Superconducting Nanowire Single-Photon Detector Array	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 2200804-2200807
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2019.2899845	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 N. Takeuchi, T. Yamashita, S. Miyajima, S. Miki, N. Yoshikawa, and H. Terai	4. 巻 vol. 29, no. 5
2. 論文標題 Demonstration of a superconducting nanowire single-photon detector using adiabatic quantum-flux-parametron logic in a 0.1-W Gifford-McMahon cryocooler	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 2201004-2201008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2019.2902771	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 S. Miyajima, M. Yabuno, S. Miki, T. Yamashita, and H. Terai	4. 巻 vol. 26, no. 5
2. 論文標題 High-time resolved 64-ch single-flux-quantum based address encoder integrated with multi-pixel superconducting nanowire single-photon detector	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 29045-29054
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.26.029045	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52件(うち招待講演 14件/うち国際学会 27件)

1. 発表者名 寺井弘高、三木茂人、藪野正裕、知名史博、宮嶋茂之、美馬覚、高瀬寛、遠藤護、古澤明
2. 発表標題 量子情報処理に向けた超伝導ナノワイヤ単一光子検出器の開発
3. 学会等名 第70回 応用物理学会春季学術講演会(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮嶋茂之、三木茂人、藪野正裕、知名史博、寺井弘高
2. 発表標題 小型機械式冷凍機に実装した大規模超伝導集積回路への直流バイアス電流供給方法の検討
3. 学会等名 第70回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Miyajima, M. Yabuno, S. Miki, H. Yamamori, S. Nagasawa, M. Hidaka, H. Terai
2. 発表標題 Multi-pixel Superconducting Nanostrip Single Photon Detectors System Monolithically Integrated with Single-Flux-Quantum Based Signal Processor
3. 学会等名 The Applied Superconductivity Conference (ASC2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Miki, M. Yabuno, F. China, S. Miyajima, H. Terai
2. 発表標題 Time multiplexing readout of multi-channel superconducting nanostrip single photon detectors using single flux quantum circuit
3. 学会等名 The Applied Superconductivity Conference (ASC2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Miyajima, M. Yabuno, S. Miki, H. Yamamori, S. Nagasawa, M. Hidaka, H. Terai
2. 発表標題 Development of monolithic integration of multi-pixel superconducting nanostrip single photon detectors array with cryogenic signal processor
3. 学会等名 The 2022 JSPS 146th Committee International Symposium on Superconductor Electronics jointed with 15th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV 2022) and QCCC 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内藤健、藪野正裕、知名史博、三木茂人、寺井弘高、清水亮介
2. 発表標題 量子もつれ光子の時間操作によるスペクトル変調
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桑名隆久、藪野正裕、知名史博、三木茂人、寺井弘高、清水亮介
2. 発表標題 光カーゲート法による2光子時間分布測定
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Kuwana, M. Yabuno, F. China, S. Miki, H. Terai, P.J. Mosley, Rui-Bo Jin, R. Shimizu
2. 発表標題 Polarization multiplexing of an ultrafast single-photon detector by optical Kerr gating
3. 学会等名 The 15th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO Pacific Rim, CLEO-PR 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Naito, M. Yabuno, F. China, S. Miki, H. Terai, R. Shimizu
2. 発表標題 Spectral modulation of biphotons via Fourier optical synthesis
3. 学会等名 The 15th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO Pacific Rim, CLEO-PR 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大島拓輝, 藪野正裕, 知名史博, 三木茂人, 寺井弘高, 清水亮介
2. 発表標題 フーリエ操作による量子もつれ光子の時間波束制御
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroki Oshima, Fumihiro China, Masahiro Yabuno, Shigehito Miki, Hiroataka Terai, and Ryosuke Shimizu
2. 発表標題 Temporal shaping of an entangled-photon wave packet by Fourier optical synthesis
3. 学会等名 The 4th. International Forum on Quantum Metrology and Sensing (IFQMS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桑名隆久, 大島拓輝, 藪野正裕, 知名史博, 三木茂人, 寺井弘高, 清水亮介
2. 発表標題 光カーゲート法を用いた超高速単一光子検出の偏光多重化
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三木茂人, 宮嶋茂之, 知名史博, 藪野正裕, 寺井弘高
2. 発表標題 SFQ回路を用いた多チャンネルSNSPDシステムの時間多重読出の実証
3. 学会等名 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三木茂人, 藪野正裕, 知名史博, 宮嶋茂之, 寺井弘高
2. 発表標題 超伝導ナノストリップを用いた単一光子検出器
3. 学会等名 電子情報通信学会 ソサイエティ大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yabuno Masahiro, Miyajima Shigeyuki, Miki Shigehito, Terai Hiroataka
2. 発表標題 Superconducting Nanowire Single-photon Detector Array with Single-Flux-Quantum Readout Circuits
3. 学会等名 The 33rd International Superconductivity Symposium (ISS2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 知名史博、竹内尚輝、三木茂人、宮嶋茂之、藪野正裕、寺井弘高
2. 発表標題 高感度 AQFP コンパレータを用いた超伝導ナノワイヤ単一光子検出器の読み出し
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 China Fumihito, Takeuchi Naoki, Miki Shigehito, Miyajima Shigeyuki, Yabuno Masahiro, Terai Hiroataka
2. 発表標題 High-sensitivity readout interface for superconducting nanowire single-photon detectors using adiabatic quantum-flux-parametron logic
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮嶋茂之、藪野正裕、三木茂人、山森弘毅、永沢秀一、日高睦夫、寺井弘高
2. 発表標題 単一磁束量子信号処理回路がモノリシック集積化された超伝導ナノワイヤ単一光子検出器アレイシステムの設計及び作製プロセスの検討
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 寺井弘高、三木茂人、宮嶋茂之、藪野正裕、知名史博、竹内尚輝、吉川信行、永沢秀一、日高睦夫、山森弘毅
2. 発表標題 超伝導ナノワイヤ単一光子検出器の高度化を目指した極低温信号処理技術の開発
3. 学会等名 QIQB x QC/NQCシンポジウム「光子検出技術」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 寺井弘高
2. 発表標題 超伝導ナノワイヤ単一光子検出器の研究開発動向
3. 学会等名 第158回微小光学研究会 「量子と光」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 知名史博、竹内尚輝、三木茂人、宮嶋茂之、藪野正裕、寺井弘高
2. 発表標題 AQFP比較器による超伝導ナノワイヤ単一光子検出器の高感度読み出し
3. 学会等名 電子情報通信学会 超伝導エレクトロニクス研究会 (SCE)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Terai, M. Yabuno, S. Miyajima, S. Miki, F. China, N. Takeuchi, and N. Yoshikawa
2. 発表標題 A large-scale SSPD imaging array with row-column multiplexing and SFQ digital signal processor
3. 学会等名 13th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 N. Takeuchi, C. L. Ayala, O. Chen, Y. He, and N. Yoshikawa
2. 発表標題 Adiabatic Quantum-Flux-Parametron: Recent Progress and Applications
3. 学会等名 13th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Terai, M. Yabuno, S. Miyajima, S. Miki, F. China, N. Takeuchi, and N. Yoshikawa
2. 発表標題 Hybrid readout scheme with row-column multiplexing and SFQ digital signal processor for a large-scale SSPD imaging array
3. 学会等名 1st workshop on Quantum and Classical Cryogenic Circuit (QCCC2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Terai, M. Yabuno, S. Miyajima, S. Miki, F. China, N. Takeuchi, and N. Yoshikawa
2. 発表標題 Recent progress in research and development of superconducting nanowire single-photon detectors
3. 学会等名 10th East Asia Symposium on Superconducting Electronics (EASSE2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Hidaka
2. 発表標題 Improvement of superconducting digital circuit fabrication process
3. 学会等名 10th East Asia Symposium on Superconducting Electronics (EASSE2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Shimizu
2. 発表標題 Time-frequency duality of biphotons
3. 学会等名 Informal workshop at the Molecular Chirality Research Centre (MCRC) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. Terai, M. Yabuno, S. Miyajima, S. Miki, F. China, N. Takeuchi, and N. Yoshikawa
2 . 発表標題 Single-photon camera with a superconducting nanowire single-photon detector array and cryogenic digital signal processing
3 . 学会等名 17th International Superconductive Electronics Conference (ISEC2019) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 R. Simizu and R. Jin
2 . 発表標題 Direct measurement of a biphoton wave packet in time and frequency domains
3 . 学会等名 The 2nd International Forum on Quantum Metrology and Sensing (IFQMS) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Takumi, F. China, M. Yabuno, S.Miki, H. Terai, R. Shimizu
2 . 発表標題 Time-resolved measurement of a single-photon wave packet with an optical Kerr effect
3 . 学会等名 Single Photon Workshop 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 N. Takeuchi, F. China, S. Miki, S. Miyajima, M. Yabuno, N. Yoshikawa, and H. Terai
2 . 発表標題 Scalable readout circuits for superconducting nanowire single-photon detectors using $\Psi$ -adiabatic quantum-flux-parametron and rapid single-flux-quantum logic families
3 . 学会等名 17th International Superconductive Electronics Conference (ISEC2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 S, Miyajima, M. Yabuno, S. Miki, and H. Terai
2. 発表標題 Demonstration of a 64-pixel superconducting nanowire single-photon imaging sensor with single-flux-quantum signal processor
3. 学会等名 17th International Superconductive Electronics Conference (ISEC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Yabuno, S, Miyajima, S. Miki, and H. Terai
2. 発表標題 Fabrication and testing of 1024-pixel NbTiN Superconducting Nanowire Single-photon Detector Array
3. 学会等名 17th International Superconductive Electronics Conference (ISEC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹内 尚輝, 知名 史博, 三木 茂人, 宮嶋 茂之, 藪野 正裕, 吉川 信行, 寺井 弘高
2. 発表標題 AQFP及びRSFQを用いたスケーラブルなSSPD読み出し回路
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂田美紗樹, 田沢久留実, 知名史博, 藪野正裕, 三木茂人, 寺井弘高, 清水亮介
2. 発表標題 和周波発生法による単一光子の超高速検出
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第40回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藪野正裕, 知名史博, 三木 茂人, 寺井 弘高
2. 発表標題 マイクロメートル幅のNbTiN超伝導薄膜線路を用いた単一光子検出素子の開発
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂田美紗樹, 田沢久留実, 知名史博, 藪野正裕, 三木茂人, 寺井弘高, 清水亮介
2. 発表標題 2光子スペクトル制御による単一光子の時間波束制御
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 知名史博, 藪野正裕, 三木茂人, 寺井弘高, 清水亮介
2. 発表標題 光カーゲート法による超高速単一光子検出II
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Yabuno, S. Miyajima, S. Miki, and H. Terai
2. 発表標題 Demonstration of a 16-pixel NbTiN superconducting nanowire single-photon detector array with a row-column readout architecture
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2018 (ASC 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 N. Takeuchi, T. Yamashita, S. Miyajima, S. Miki, N. Yoshikawa, and H. Terai
2 . 発表標題 Demonstration of a superconducting nanowire single-photon detector using adiabatic quantum-flux-parametron logic in a 0.1 W Gifford-McMahon cryocooler
3 . 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2018 (ASC 2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Miyajima, M. Yabuno, S. Miki, and H. Terai
2 . 発表標題 Single-Flux-Quantum based Event-Driven Encoder for Large-Pixel Superconducting Nanowire Single-Photon Detector Array
3 . 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2018 (ASC 2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 H. Terai, S. Miki, W. Qiu, S. Miyajima, M. Yabuno, and F. China
2 . 発表標題 Research activities on superconducting devices in NICT
3 . 学会等名 12th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 N. Takeuchi, T. Yamashita, S. Miyajima, S. Miki, N. Yoshikawa, and H. Terai
2 . 発表標題 Adiabatic quantum-flux-parametron logic as a readout interface for superconducting nanowire single photon detectors
3 . 学会等名 12th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Shimizu
2. 発表標題 Duality between time and Frerquency distributions of biphotons
3. 学会等名 The 3rd China Optics Valley Aerospace Laser & Quantum Technology Forum (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Shimizu
2. 発表標題 Direct measurement of time-frequency distribution of biphotons
3. 学会等名 The 5th MIPT-UEC-LPI International Workshop on Atomic (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藪野正裕, 知名史博, 三木茂人, 清水亮介, 寺井弘高
2. 発表標題 シングルピクセルの超伝導ナノワイヤ単一光子検出器を用いた時分割多重検出型位置検出および分光検出システムの開発
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮嶋茂之、藪野正裕, 三木茂人, 寺井弘高
2. 発表標題 1kピクセルSSPDアレイシステムに向けた32 x 32 ch SFQイベント駆動型エンコーダの動作実証
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 八木澤拓実, 浅村尚人, 藪野正裕, 三木茂人, 寺井弘高, 清水亮介
2. 発表標題 2光子時間位相変調による量子もつれ光子のスペクトル操作
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田沢久留実, 浅村尚人, 藪野正裕, 三木茂人, 寺井弘高, 清水亮介
2. 発表標題 任意時間波束操作に向けた2光子スペクトルの多モード化
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 浅村尚人, 藪野正裕, 三木茂人, 寺井弘高, 清水亮介
2. 発表標題 2光子スペクトル位相変調による量子もつれ光子の時間波束操作
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 工貴大, 内藤僚, 藪野正裕, 三木茂人, 寺井弘高, 清水亮介
2. 発表標題 光カーゲート法による超高速単一光子検出
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 八木澤拓実, 浅村尚人, 藪野正裕, 三木茂人, 寺井弘高, 清水亮介
2. 発表標題 2光子時間波束位相変調による量子もつれ光子のスペクトル操作II
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計4件

産業財産権の名称 超伝導ストリップ検出器およびそれに用いられる超伝導ストリップの製造方法	発明者 藪野正裕、三木茂人、寺井弘高	権利者 国立研究開発法人情報通信研究機構
産業財産権の種類、番号 特許、2022-168777	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 超伝導単一光子検出システム	発明者 三木茂人、寺井弘高	権利者 国立研究開発法人情報通信研究機構
産業財産権の種類、番号 特許、2022/JP2022/029097	出願年 2022年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 光子検出装置	発明者 竹内 尚輝, 三木 茂人, 寺井 弘高	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2019-090365	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 光子検出装置	発明者 竹内 尚輝, 三木 茂人, 寺井 弘高	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2019-037650	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>未来ICT研究所&gt;研究紹介&gt;超伝導デバイスプロジェクト  <a href="https://www2.nict.go.jp/advanced_ict/research.html#superconductive">https://www2.nict.go.jp/advanced_ict/research.html#superconductive</a></p>
---

## 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
研究分担者	山森 弘毅  (Yamamori Hirotake)  (00358293)	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・研究グループ長   (82626)	
研究分担者	竹内 尚輝  (Takeuchi Naoki)  (00746472)	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   (82626)	
研究分担者	清水 亮介  (Shimizu Ryosuke)  (50500401)	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授   (12612)	

## 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会	開催年
12th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV2019)	2019年～2019年

## 8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関