

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02206

研究課題名（和文）超伝導単一光子検出素子の集積化によるオンチップ量子光学回路の実現

研究課題名（英文）Onchip quantum photonic circuit integrated with superconducting single photon detectors

研究代表者

三木 茂人（Miki, Shigehito）

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・主任研究員

研究者番号：30398424

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：導波路結合型超伝導ナノワイヤ単一光子検出器(WG-SSPD)を開発し、Si導波路上に集積化されたWG-SSPDを用いたオンチップ量子干渉計によってオンチップ上での光子干渉観測に成功した。また、量子光学回路(QPC)の後段信号処理としてQPC用超伝導単一磁束量子(SFQ)回路の開発および動作実証を実施した。特に、同時計数回路を用いた2光子干渉観測はSFQ回路を用いたものとしては初めての報告となる。最後に、QPCの大規模化に向けてSi導波路とWG-SSPDを貼り合わせるハイブリッド集積化の検討を実施し、WG-SSPDへの光吸収が有効に機能する事を有限要素法によるシミュレーションによって確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、国内外において量子暗号技術や量子インターネットの実現にむけて、光子を用いた量子情報通信技術の研究開発が進められているが、オンチップ量子光学回路(QPC)は光学機能素子を光導波路によって集積化することで、極めて小面積領域内に低損失で安定性の高い量子情報システムを構築することが可能となることから重要な技術として期待される。QPCにおいて光子検出器は重要な役割を担うが、本提案における導波路結合型超伝導ナノワイヤ単一光子検出器(WG-SSPD)はQPC上で100%近い検出効率が期待されるため、WG-SSPDの開発および集積化技術が実現すれば、スケーラブルなオンチップQPC回路の実現が期待される。

研究成果の概要（英文）：We have developed a waveguide-coupled superconducting nanowire single photon detector (WG-SSPD), and succeeded to observe photon interference by an on-chip quantum interferometer using WG-SSPD integrated on a Si waveguide. We also developed and demonstrated the operation of a superconducting single flux quantum (SFQ) circuit for QPC as a signal processing for quantum photonic circuit (QPC). In particular, we succeeded to observe two-photon interference by using a SFQ coincidence circuit. We also conducted a study of hybrid integration in which the Si waveguide and WG-SSPD are bonded together for the large-scale QPC, and simulated that the photon absorption to the WG-SSPD. We confirmed the effective absorption to the WG-SSPD by the finite element simulation.

研究分野：超伝導検出器

キーワード：超伝導光子検出器 量子光学回路

1. 研究開始当初の背景

単一光子を情報担体として用いる量子光学研究分野では、量子物理現象の解明などを目的とした基礎研究から、量子通信・量子計算・量子暗号鍵配送などをはじめとする量子情報通信技術への応用展開など、幅広い研究開発が盛んに進められている。このような光子を用いた量子情報通信技術においては、多くの場合、光学定盤上にフィルタ・ミラー・レンズ・スプリッタや光子検出器など様々な光学部品群を配置する事によりその機能を実現している。しかし、光学部品群の高精度な位置調整と高い安定性が要求されるため、量子情報システムの規模拡大に対して、それを実現するための技術的困難性は飛躍的に増大する事が大きな課題となっている。この問題に対し、オンチップ量子光学回路(Quantum Photonic Circuit; QPC)の研究開発が注目されている。オンチップ QPC では光干渉計やスプリッタ、微小光共振器など量子光学において重要となる光学機能素子を光導波路によって集積化することで、極めて小面積領域内に低損失で安定性の高い量子情報システムを構築することが可能となる。

オンチップ QPC の実現において光導波路上を伝搬する光子を高効率に捉えるためには、光子検出器の集積化は重要な命題の一つとなってくる。このような中で近年、導波路結合型超伝導ナノワイヤ単一光子検出器(Waveguide coupled superconducting nanowire single photon detector; WG-SSPD)が注目されている。WG-SSPD は QPC 上において 100%近い検出効率が期待される為、**WG-SSPD の集積化が実現すれば、量子情報技術において根幹となる多光子の状態検出をオンチップ上で極めて効率的に行うことが可能となる。**また、SSPD が有している低タイムジッタ特性を WG-SSPD においても実現し、光子のコヒーレント時間以下の超高時間分解能での光子検出が可能となれば、連続波励起された複数の独立した光子源を用いて多光子干渉を観測することが可能となり、革新的な量子情報通信技術のパラダイム創出が期待出来る。

2. 研究の目的

光導波路により構成されたもつれ光子対源やマッハツェンダ干渉計(MZI)などの光機能素子と、高検出効率・高時間分解能を有する複数の WG-SSPD、および超伝導単一磁束量子(Single Flux Quantum; SFQ)回路による高時間分解信号処理回路を全てチップ上に集積化し、もつれ光子対の生成から干渉の制御・観測までが可能なオンチップ QPC を実現することを研究目的とする。

3. 研究の方法

本研究の重要な技術課題として、WG-SSPD の開発および、SFQ 回路を用いた SSPD 用信号処理技術の開発が挙げられる。そこで、これらの技術課題を中心に研究開発に取り組んだ。まず最初に、シリコン(Si)導波路上 WG-SSPD 素子の作製プロセスを実際に開発し、WG-SSPD 素子の性能評価を実施した。また、WG-SSPD を用いたオンチップ量子干渉計を開発し、オンチップ上での光子干渉観測を実施した。

SFQ 回路を用いた SSPD 用信号処理技術の開発としては、16 個の SSPD からの信号を多重化可能な時間多重回路、2 個の SSPD からの出力の同時計数回路を開発し、実際に動作実証に成功した。また開発した同時計数回路を用いて、実際に非古典もつれ光子対の 2 光子干渉観測を行った。最後に、QPC の大規模化に向けた新たなアプローチとして、SSPD と QPC のハイブリッド集積化の検討を実施した。

4. 研究成果

(1) Si 導波路と WG-SSPD によるオンチップ量子干渉計の開発

Si 導波路上に集積化された WG-SSPD 素子を作製する方法として、まず最初に Si 導波路を形成してから WG-SSPD を作製する方法を検討したが、Si 導波路形成プロセスによって、基板表面状態が悪化しナノワイヤの均一性が悪化することから、良好な特性を有した WG-SSPD が作製出来なかった。そこで、図 1 に示す様な作製プロセスによって、最初に WG-SSPD を形成する NbTiN 薄膜を成膜した後に、Si 導波路を形成し、その後、超伝導ナノワイヤを形成するプロセスを確立した。このプロセスによって、図 2 に示す様な Si 導波路によるビームスプリッタ、グレーティングカプラおよび、2 つの WG-SSPD から形成されるオンチップ量子干渉計の作製を行った。作製されたオンチップ量子干渉計はグレーティングカプラを介して光ファイバと接続され、冷凍機内に実装され、動作実証を行った。まず最初に、WG-SSPD の検出効率の評価を実施したところ、

2つのWG-SSPDは図3に示す様に、それぞれ93%、88%と高い内部検出効率を示す事に成功した。また、1光子干渉観測を行った結果、図4に示すような明瞭な干渉縞を観測する事に成功した。

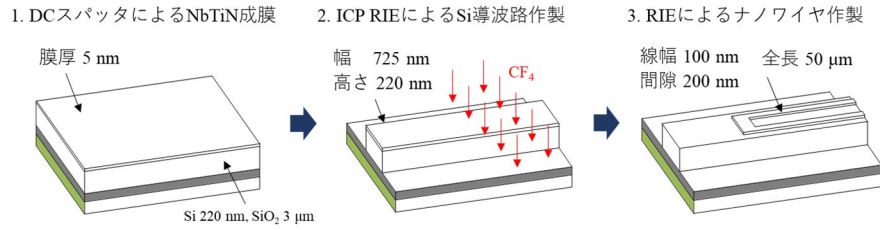


図1 WG-SSPDの作製プロセス

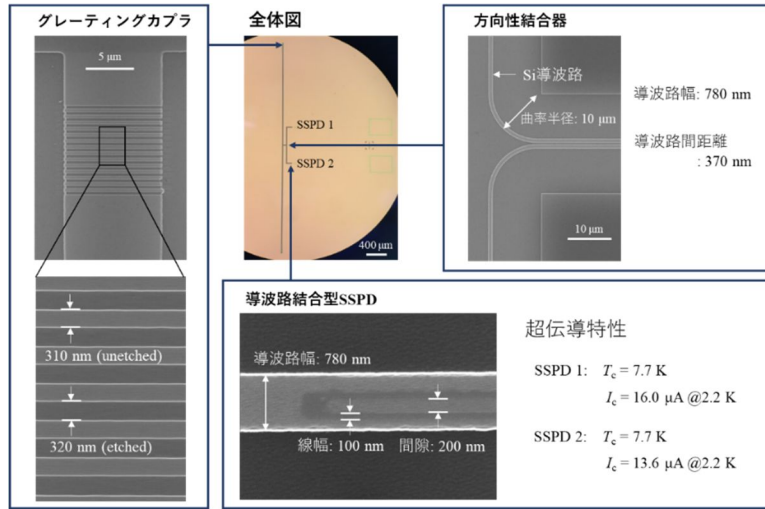


図2 作製したオンチップ量子干渉計

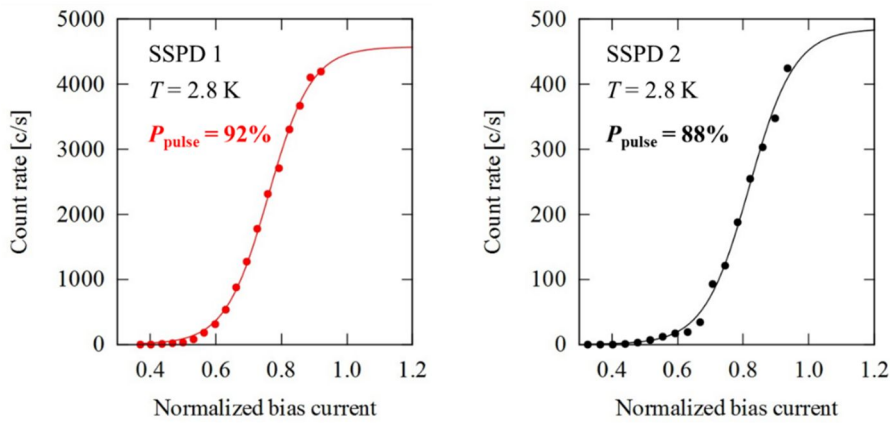


図3. オンチップ量子干渉計上に作製されたSSPDの内部検出効率測定結果

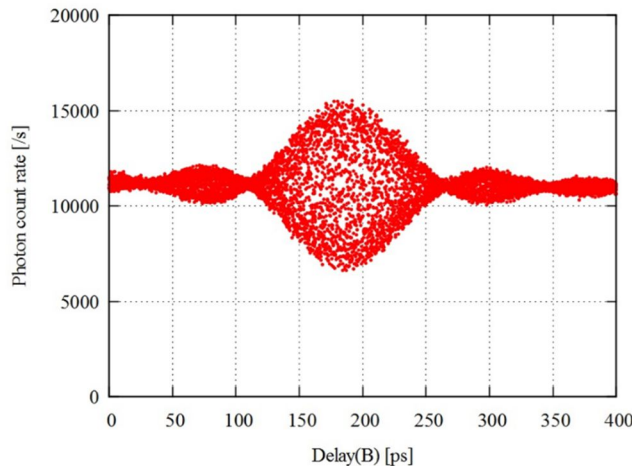


図4. オンチップ量子干渉計によって観測された光子干渉

(2) SFQ 回路を用いた SSPD 多重化回路の開発および動作実証

QPC 回路の大規模化に伴って必要となる WG-SSPD の数は増加するため、後段信号処理回路として期待される SFQ 信号処理回路も多数の入力チャンネルを有する必要性が生じる。そこで、16 個の入力ポートを有する SFQ 回路を開発し、実際に全ての入力ポートと SSPD 素子を接続し、動作実証を行った。SSPD 素子は独立した 16 個の超伝導ナノワイヤから構成される SSPD アレイ(図 5. 16 エlement SSPD アレイ)を使用し、16 入力 SFQ 信号処理回路と同一パッケージ内に実装され、冷凍機内で冷却された。16 入力 SFQ 回路は、SSPD からの出力電気信号を SFQ パルスに変換する磁気結合型 DC/SFQ(MC-DC/SFQ)コンバータと、コンフルエンスバッファ(CB)から構成される時間多重回路、出力信号発生のための SQUID ドライバから構成されており、いずれの入力ポートに信号が入力されても、SFQ 回路から出力パルス信号が発生するような時間多重機能を有する(図 5. 16 入力 SFQ マージャー)。SFQ 回路からの出力パルスは半値全幅(FWHM)で 0.62 ns 程度となっており、SSPD 本来の出力信号幅(>10 ns)よりも短くなっている。SFQ マージ回路を適用した 16 エlement SSPD システムの検出効率のバイアス電流依存性を、SFQ マージ回路を介さない場合と比較したところ、両者がほぼ一致する事を確認した(図 6)。このことから、SFQ マージ回路で全Elementからの出力を間違えることなく確実に読み取り、多重化出力していることが分かった。

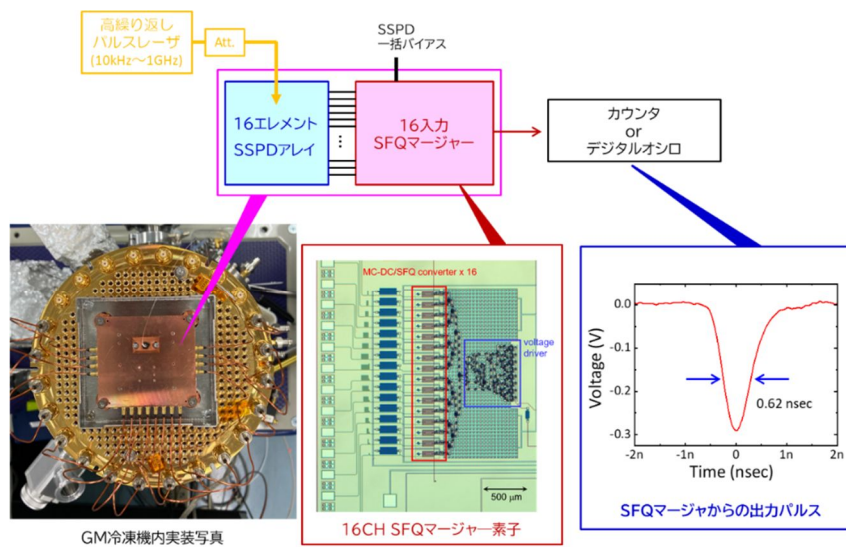


図 5. 16 エlement SSPD アレイ-16 入力 SFQ 回路実装系の概略

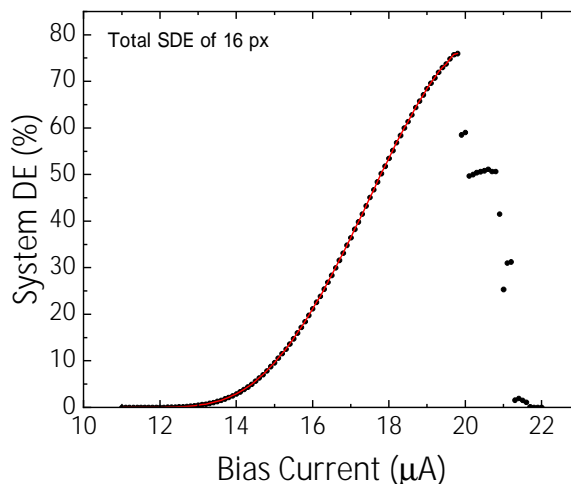


図 6. SFQ 回路を介した場合と介さなかった場合における 16 エlement SSPD アレイのシステム検出効率のバイアス電流依存性

(3) SFQ 同時計数回路の開発による 2 光子干渉観測

量子光学回路の後段信号処理として重要となる同時計数回路を SFQ 回路で設計し、開発を行った。図 7 に設計した SFQ 回路構成図を示す。回路は、図中の MC-DC/SFQ コンバータで SSPD からの入力信号を単一磁束量子(SFQ)パルスに変換し、AND 回路 a,b にそれぞれ入力される。AND 回

路は入力 a、b に Δt の時間間隔内に SFQ パルスが同時に入力されると出力パルスが生成される。すなわち、2 個の SSPD がある時間窓 ($\sim 200\text{ps}$) の間に同時に光子を検出した場合、SFQ 同時計数回路から出力信号が得られる。実際に 2 個の SSPD と SFQ 同時計数回路を同一冷凍機内に実装し、非古典もつれ光子対源にたいし、95% と高い忠実度で 2 光子干渉の観測に成功した。SFQ 回路を用いた観測としては初めての報告であり、本提案における重要な構成要素となる SFQ 同時計数回路が、SNSPD と集積化が可能な極低温環境下で有効に機能することが確認出来た。

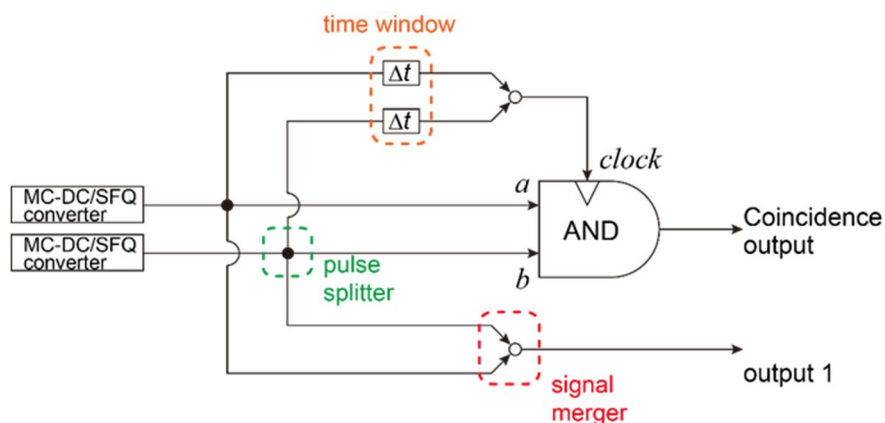


図 7. SFQ 回路を用いた同時計数回路

(4) WG-SSPD と QPC とのハイブリッド集積化に向けた検討

先に述べた様に、我々は Si 導波路上に WG-SSPD 回路を作製し、干渉計の開発を実施した。しかしながら、多光子干渉の観測、あるいは量子光学回路のさらなる大規模化を考えると、高品質な Si 導波路上に高性能 WG-SSPD を多数個形成することに対する開発困難性が極めて高い事が、本研究を進めることによって分かってきた。そこで、Si 導波路による光学回路と、SSPD 素子を別のチップ上に作製した後、これらを貼り合わせる手法の検討を開始した。本手法における懸念点として、Si 導波路と超伝導ナノワイヤ素子を実際に貼り合わせた際にシリコン導波路と超伝導ナノワイヤとの間に空間的な間隙が生じる可能性が考えられる。そこで、このような空間的な間隙が生じて、超伝導ナノワイヤへの有効な光子吸収が生じるかどうかについて、有限要素法によるシミュレーションを実施した。実施結果を図 8 に示す。図でのシミュレーションモデルでは導波路 - 超伝導ナノワイヤ間の間隙は 40nm 程度となっている。シミュレーションを実施した結果、間隙が生じていても、図のように超伝導ナノワイヤを設置することにより、導波路内を伝搬する光が減衰している事が分かる。また本モデルにおいて、上部に超伝導ナノワイヤを設置しない場合は、ほぼ 100% で光が減衰することなく伝搬することを確認しており、超伝導ナノワイヤへの光吸収が発生することをシミュレーション上で確認することが出来た。

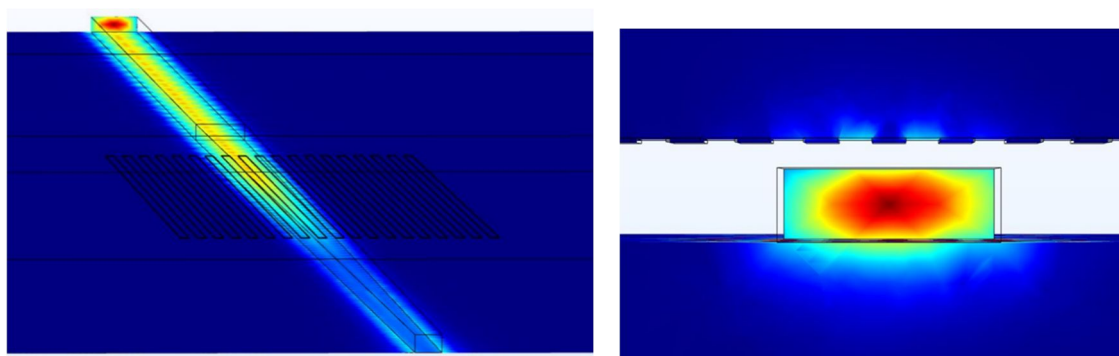


図 8. シリコン導波路の上部に SNSPD 素子を設置した際の光吸収シミュレーション結果

以上、本研究において、QPC と直接集積化が可能な WG-SSPD の開発、WG-SSPD を用いたオンチップ量子干渉計の開発、および SFQ 回路による後段信号処理回路の開発に取り組んだ。SFQ 回路による後段信号処理までを含んだ WG-SSPD を用いた QPC の実現にむけた成果は他に例がなく、また、大規模 QPC に向けた問題点の提起と解決に向けた検討も本研究内で実施する事が出来た。これらの成果は、今後の大規模 QPC 実現にむけた大きな一歩であるといえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 M. Yabuno, S. Miyajima, S. Miki, and H. Terai	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 F. China, N. Takeuchi, S. Miki, M. Yabuno, S. Miyajima, H. Terai	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 IOP Superconductor Science and Technology	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） 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 R. Fujimoto, S. Murakami, T. Kobayashi, R. Ikuta, S. Miki, S. Miyajima, M. Yabuno, F. China, H. Terai, N. Imoto	4. 巻 14
2. 論文標題 Entangled photon pair detection by superconducting nanowire single-photon detectors with a single-flux-quantum coincidence circuit	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 102001-1-3
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/ac211e	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. Miki, S. Miyajima, F. China, M. Yabuno, H. Terai	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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 9件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 三木茂人、宮嶋茂之、藪野正裕、知名史博、寺井弘高
2. 発表標題 16エレメント超伝導ナノストリップ単一光子検出器の特性評価
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 S. Miki, S. Miyajima, M. Yabuno, F. China, H. Terai
2. 発表標題 16-elements NbTiN superconducting nanowire single photon detector with superconducting single flux quantum merger
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference (ASC 2020 Virtual Conference) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Miki
2. 発表標題 Diverse research on superconducting nanowire single photon detectors
3. 学会等名 2nd workshop on Quantum and Classical Cryogenic Devices, Circuits, and Systems (QCCC 2020) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三木茂人
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技術
3. 学会等名 令和2年 電気学会 基礎・材料・共通部門大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三木茂人
2. 発表標題 超伝導ナノストリップ(ナノワイヤ)を用いた単一光子検出技術の開発
3. 学会等名 QIQB×QCQC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、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×QCQC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 三木茂人、宮嶋茂之、藪野正裕、知名史博、寺井弘高
2. 発表標題 16エレメント超伝導ナノストリップ単一光子検出システムの開発II
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 M. Yabuno, S. Miyajima, S. Miki, H. Terai
2. 発表標題 Superconducting Nanowire Single-photon Detector Array with Single-Flux-Quantum Readout Circuits
3. 学会等名 33rd International Superconductivity Symposium (ISS2020) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三木茂人、宮嶋茂之、藪野正裕、知名史博、寺井弘高
2. 発表標題 16エレメント超伝導ナノストリップ単一光子検出システムの開発III
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 Shigehito Miki
2. 発表標題 Toward realization of superconducting nanowire single photon imaging system
3. 学会等名 Superconducting Quantum Devices SQD 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shigehito Miki, Masahiro Yabuno, Shigeyuki Miyajima, Hirotaka Terai
2. 発表標題 Demonstration of NbTiN SNSPD array with reduced readout line
3. 学会等名 14th European Conference on Applied Superconductivity(EUCAS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shigehito Miki, Masahiro Yabuno, Shigeyuki Miyajima, Hirotaka Terai
2. 発表標題 Research toward realization of NbTiN SSPD imaging array system
3. 学会等名 Shingle Photon Workshop (SPW2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shigehito Miki, Yuma Fujii, Masahiro Yabuno, Fumihiko China, Shigeyuki Miyajima, Hirotaka Terai
2. 発表標題 Exploration of optimum NbTiN films for high performance superconducting nanowire single photon detectors
3. 学会等名 The 2nd International Forum on Quantum Metrology and Sensing (The 2nd IFQMS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三木茂人、藪野正裕、宮嶋茂之、寺井弘高
2. 発表標題 超伝導ナノワイヤを用いた単一光子検出技術の開発
3. 学会等名 一般社団法人レーザー学会学術講演会 第40回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三木茂人、藪野正裕、宮嶋茂之、知名史博、寺井弘高
2. 発表標題 16エレメント超伝導ナノワイヤ単一光子検出システムの開発I
3. 学会等名 第76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 宮嶋茂之、知名史博、三木茂人、藪野正裕、寺井弘高
2. 発表標題 超伝導ナノワイヤ単一光子検出器と単一磁束量子回路を用いた光子数識別システムの開発
3. 学会等名 第76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 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 2021年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三木茂人、宮嶋茂之、藪野正裕、知名史博、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 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
研究分担者	寺井 弘高 (Terai Hirotaka) (10359094)	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 (82636)	
研究分担者	宮嶋 茂之 (Miyajima Shigeyuki) (50708055)	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・主任研究員 (82636)	
研究分担者	藪野 正裕 (Yabuno Masahiro) (70777234)	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・研究員 (82636)	

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0件

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
---------	---------