

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15472

研究課題名（和文）単一光子スペクトル計測を実現するオンチップ超伝導単一光子分光検出素子の開発

研究課題名（英文）Development of a superconducting spectroscopic single-photon detector for spectroscopic measurement of single photons

研究代表者

藪野 正裕（Yabuno, Masahiro）

国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所フロンティア創造総合研究室・研究員

研究者番号：70777234

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：光導波路型分光素子と超伝導ナノワイヤ単一光子検出器（SNSPD）、超伝導デジタル回路を統合した単一光子分光検出システムの実現を目指して研究を行い、行列読み出し型16素子SNSPDアレイの動作実証、行列読み出し型SNSPDアレイと超伝導デジタル回路を統合したシステムの動作実証、従来よりも太い超伝導線路を用いた単一光子検出技術の実証に成功した。またこれらの成果をもとに導波路結合型SNSPDアレイ検出器の設計を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光の最小単位である光子一個をその波長を識別しながら高感度に検出する単一光子分光検出器は、生命科学から宇宙物理学まで広範な科学分野において基盤技術となることが期待される。本研究では、高感度な単一光子検出器である超伝導ナノワイヤ単一光子検出器（SNSPD）を多素子アレイ化する技術の開発に成功し、またより多数の素子のアレイ化や素子の量産化が可能となる太い超伝導線路を用いた単一光子検出技術の実証にも成功した。またこれらをもとに導波路結合型のSNSPDアレイの設計も行った。以上は、多数の波長チャンネルを備える高感度単一光子分光検出器の実現に繋がる成果である。

研究成果の概要（英文）：We have developed a superconducting nanowire single photon detector (SNSPD) array system toward to integration with an arrayed waveguide grating device for realizing a highly-sensitive single-photon spectroscopic detection. We have succeeded to develop a row-column readout 16-element SNSPD array and integrating it with a superconducting digital circuit. We have also succeeded to demonstrate single-photon detection with a wider superconducting strip. We also designed a waveguide-coupled SNSPD array system.

研究分野：超伝導エレクトロニクス、量子光学

キーワード：超伝導単一光子検出器

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

光の最小単位である光子 1 個を検出する単一光子検出器は、量子情報処理や生体蛍光イメージング、ライダーによるリモートセンシングなど先端科学を支える基盤技術となっている。単一光子分光検出器は、光子を高効率、高時間分解能で検出するだけでなく、その波長を識別して検出する単一光子検出器であり、波長多重化を用いた量子情報通信の大容量・高速化や多波長(マルチカラー)での高感度生体蛍光イメージングなど先端光技術のさらなる高性能化・高機能化を可能にする。また、光子の波長には光子を放出した物体の種類やエネルギー状態に関する情報が含まれるため、単一光子分光検出器によって、単一光子のスペクトルやその時間発展を計測できるようになると、物理現象や生命現象、化学反応などを解析するための強力なツールになると期待される。したがって、高効率、高時間分解能、高波長分解能な単一光子分光検出器の実現は、基礎から応用科学まで広範な分野で活用される基盤技術になると期待される。

単一光子分光検出技術の確立には、高効率な単一光子検出器が必要不可欠であるが、研究代表者が所属する研究グループで研究してきた超伝導ナノワイヤ単一光子検出器(SNSPD)は、可視～近赤外の広い波長帯域で感度を持ち、80%以上の高検出効率と50 ps以下の高時間分解能を備えた単一光子検出器であることから、これを分光検出に応用することで高効率・高時間分解能な単一光子分光検出器を実現できると考えられた。さらに、高分解能かつ多波長での分光検出を実現するには、単一光子検出器の多素子アレイ化が求められる。冷凍機内への実装が必要な超伝導単一光子検出器の多素子アレイ化には信号ケーブル数の増加に伴う熱負荷の増大が大きな障壁となるが、先行研究で提案された行列読み出し型のSNSPDと研究代表者が所属する研究グループで研究されてきた超伝導デジタル回路を用いた信号読み出し技術を組み合わせることで、信号ケーブル数を大幅に削減し、SNSPDの多素子アレイ化を実現できると考えられた。一方、分光技術においては、光導波路中での干渉を用いて光子を分光し、波長ごとに異なる導波路へ分配するアレイ導波路回折格子(AWG)が高安定、高波長分解能なオンチップ分光素子として実用化されており、AWGを用いることで、冷凍機内で光子を高効率・高安定・高波長分解能で分光できると考えられた。さらに、先行研究において光導波路上にSNSPDを作製することで光導波路中の光子を100%近い効率で検出可能な導波路結合型SNSPDが実証されており、AWG分光素子とSNSPDアレイのオンチップ集積化も可能と考えられた。これらのことから、導波路結合型SNSPD、行列読み出し回路構造と超伝導デジタル回路を用いた多重化信号読み出し技術、AWG分光素子の3つの技術を組み合わせれば高効率、高時間分解能、高波長分解能な単一光子分光検出器の開発とそのオンチップ集積化が可能になると考えられ、単一光子分光検出技術の確立に貢献することが期待された。

2. 研究の目的

本研究では、行列読み出し回路構造と超伝導デジタル回路による多重化信号読み出し技術を用いたSNSPDの多素子アレイ化を実現し、AWG分光素子と組み合わせることで、高効率、高時間分解能、高波長分解能な単一光子分光検出器を開発することを目的としている。将来的に導波路結合型SNSPDアレイと超伝導デジタル回路、AWG分光素子をオンチップに集積化することを目指しており、本課題期間では、16波長チャンネルの導波路結合型SNSPDアレイ検出器の開発を目標に研究を行ってきた。

3. 研究の方法

(1) SNSPDの多素子アレイ化には少数の信号配線で多数のSNSPD素子の読み出しを可能にする多重化信号読み出し技術が必要となる。本研究では、 N^2 個の素子を $2 \times N$ 本の信号配線で読み出すことが可能な行列読み出し回路構造を持つSNSPDアレイの開発を行った。窒化ニオブチタン(NbTiN)超伝導薄膜を用いた16素子行列読み出し型SNSPDアレイを作製し、ギフォード・マクマホン(GM)冷凍機内に実装して、温度2K付近まで冷却して動作評価を行った。

(2) 信号配線数のさらなる削減を実現するため、信号多重化用の超伝導デジタル回路を備えたSNSPDアレイシステムの開発を行った。 $2 \times N$ 個の信号出力から光子を検出した素子のアドレスを判別し、デジタルビットコードに変換して2本の信号ケーブルで出力する超伝導デジタル回路を行列読み出し型SNSPDアレイと1パッケージに実装・統合したシステムを作製し、GM冷凍機内に実装して、温度2K付近まで冷却して動作評価を行った。

(3) SNSPDの多素子アレイ化では検出素子の歩留まりの向上も重要となる。特に光導波路上にSNSPDを作製する導波路結合型SNSPDは通常の素子よりも作製が難しいため、歩留まりの向上はより重要な課題である。素子作製を容易にし、歩留まりを向上させることを目的として、従来のSNSPDよりも10倍以上太い超伝導線路を用いた単一光子検出器の研究を行った。NbTiNの超伝導薄膜を用いて線幅2 μm までの超伝導線路を用いた素子を作製し、GM冷凍機内に実装して、温度2K付近まで冷却して動作評価を行った。

(4) AWG分光素子との集積化に向けて、従来よりも太い超伝導線路を用いた導波路結合型SNSPDと行列読み出し回路構造を採用した導波路結合型SNSPDアレイの開発を行った。

4. 研究成果

(1) 図1は、NbTiN 超伝導薄膜を用いた 16 素子行列読み出し型 SNSPD アレイの受光部全体の顕微鏡写真である。縦横に 4 素子ずつ合計 $4 \times 4 = 16$ 素子の SNSPD が配列されており、1 素子あたりの感光領域のサイズは $5 \times 10 \mu\text{m}^2$ である。いずれかの素子で光子が検出されると検出素子の位置座標を示す行方向と列方向の 2 つの信号出力が得られる回路構成となっており、これにより N^2 個の素子を $2 \times N$ 本の信号配線で読み出すことが可能である。図2は、光子検出による出力信号の例であり、行と列に対応した出力信号ペアが得られている。波長 $1.55 \mu\text{m}$ において 16 素子の全てで単一光子検出に成功した。

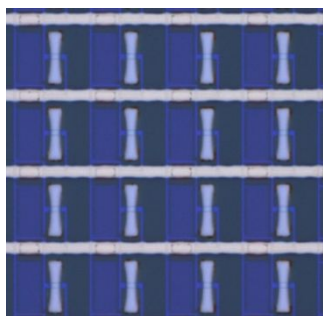


図 1. 16 素子行列読み出し型 SNSPD アレイの受光部

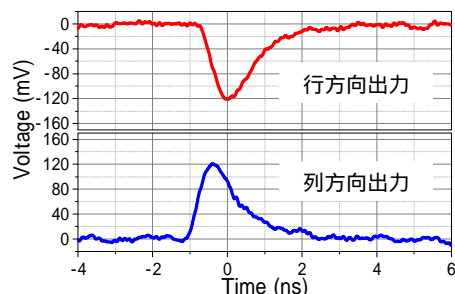


図 2. 行列読み出し型 SNSPD アレイの出力信号

(2) 図3は、行列読み出し型 SNSPD アレイと超伝導デジタル回路を 1 パッケージに実装・統合したシステムの写真である。SNSPD アレイと超伝導デジタル回路は専用設計のプリント回路基板とワイヤボンディングを介して接続されている。図4は、光子検出による出力信号の例である。検出素子の行方向と列方向の座標に対応した 2 つのビットコード信号が得られている。ビットコードは 3 ビットで構成されており、最初のビットはその立ち上がりが光子検出のタイミングを示すタイミングビットであり、続く 2 ビットが行方向、又は列方向の座標を示すアドレスビットである。16 素子の全てに対応するビットコード信号のペアを得ることに成功した。また、超伝導デジタル回路を介した上で 80 ps 以下の低システムジッタの達成にも成功した。

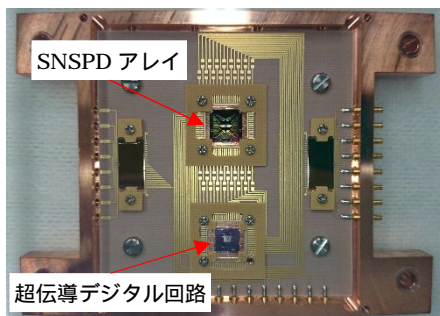


図 3. SNSPD アレイと超伝導デジタル回路を統合したシステム

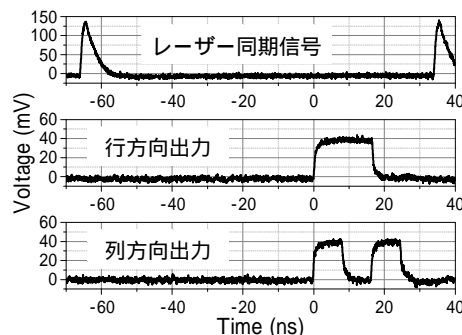


図 4. 超伝導デジタル回路を介した出力信号

(3) 図5は、太い超伝導線路を用いた単一光子検出器の顕微鏡写真である。線幅が $0.5 \sim 2 \mu\text{m}$ までの超伝導線路を用いた単一光子検出器を作製した。図6は、線幅 $1 \mu\text{m}$ の超伝導線路を用いた単一光子検出器の出力信号である。何れの線幅においても波長 $0.4 \sim 1.55 \mu\text{m}$ において単一光子を検出することに成功した。

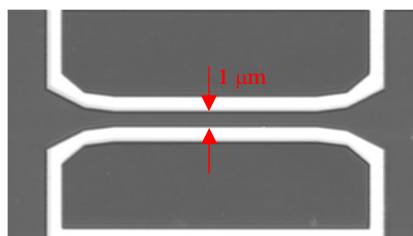


図 5. 線幅 $1 \mu\text{m}$ の超伝導線路を用いた単一光子検出器

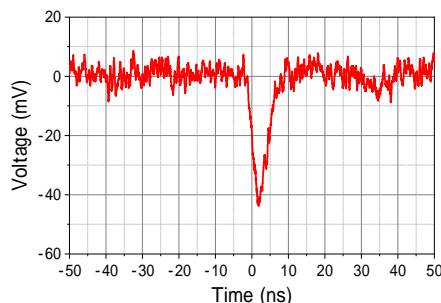


図 6. 線幅 $1 \mu\text{m}$ の超伝導線路を用いた単一光子検出器の出力信号

(4) 従来よりも太い超伝導線路を用いた導波路結合型 SNSPD を設計し、また行列読み出し回路構造を採用した導波路結合型 SNSPD アレイの設計を行った。素子の作製については遅れているものの作製プロセスの検討を進めており、素子試作を進める計画である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Masahiro Yabuno, Shigeyuki Miyajima, Shigehito Miki, Hirotaka 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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Masahiro Yabuno, Shigeyuki Miyajima, Shigehito Miki, Hirotaka Terai
2. 発表標題 Fabrication and testing of 1024-pixel NbTiN Superconducting Nanowire Singlephoton Detector Array
3. 学会等名 The 17th International Superconductive Electronics Conference (ISEC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Yabuno, Shigeyuki Miyajima, Shigehito Miki, Hirotaka Terai
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 Symposium on Superconductivity (ISS 2020) (招待講演) (国際学会)
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 フォトリソグラフィプロセスで作製したメアング型のNbTiN超伝導マイクロストリップ単一光子検出器の評価
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

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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