

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：82636

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H07477

研究課題名(和文) 単一光子の位置検出を実現する時間分割多重単一光子イメージング検出器の開発

研究課題名(英文) Development of time-division-multiplexed single-photon imaging system

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) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：時分割多重化を用いてシングルピクセルの超伝導ナノワイヤ単一光子検出器(SSPD)で光子の位置検出や分光検出を実現する技術の開発を行った。光子の位置情報を検出時間情報に変換・多重化する光学系を開発し、それを用いて検出時間ヒストグラムから検出位置分布を再構築できることを実証した。また光子の波長情報を検出時間情報に変換・多重化する光学系を開発し、検出時間スペクトルから波長スペクトルを再構築できることを実証した。

研究成果の概要(英文)：We demonstrated a time-division-multiplexed single-photon position detection and single-photon spectroscopic detection using a single-pixel superconducting nanowire single photon detector (SSPD). We developed an optical system that converts position information or spectroscopic information of photons into detection time information. The detection time histogram measured with the developed system reproduced the detection position distribution or the wavelength spectrum of photons.

研究分野：超伝導エレクトロニクス、量子光学

キーワード：単一光子検出器 超伝導デバイス 量子光学 位置検出 分光検出

### 1. 研究開始当初の背景

近年、光量子情報技術の研究開発が活発になっている。このような技術の開発においては、単一の光子を検出・カウントする技術が必要不可欠であるが、とりわけ、光子を空間上の一点においてのみならず、測定平面上でその入射位置を特定したうえで検出・カウントすることが可能なイメージング検出技術は、光子の放射方向検出や2次元画像検出といった光子の空間的な情報の検出や、分光器と組み合わせた単一光子分光検出などへの応用が可能なことから、その実現が望まれていた。

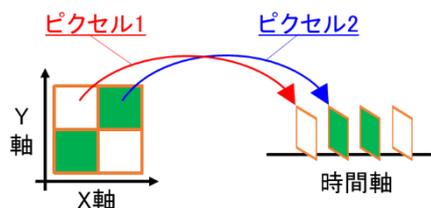
超伝導ナノワイヤ単一光子検出器 (Superconducting nanowire single-photon detector; SSPD) は、高検出効率、低暗計数率、低ジッタ (高時間分解能)、アフターパルスフリー、広い検出可能波長帯域といった優れた特性を持つ単一光子検出器である。この優れた特性から、シングルピクセルの SSPD は、量子情報通信、生体蛍光検出、深宇宙通信などの広範な分野で応用が進められている。近年、この SSPD を多数個配列することで光子の位置検出を実現するイメージング検出器の開発が国際的に進められているが、冷凍機内に導入可能な信号配線数の制限などがピクセル数の増加を困難にしており、実際の応用に向けてはさらなる研究開発が必要な状況にあった。

一方で、SSPD の高時間分解能、アフターパルスフリーという特徴に着目すると、時間軸上に配列した光子の識別検出が可能であり、光子の位置情報を時間情報に変換するような光学系を用いるならば、時分割多重化によりシングルピクセルの SSPD を用いて光子の位置検出が可能になると期待された。

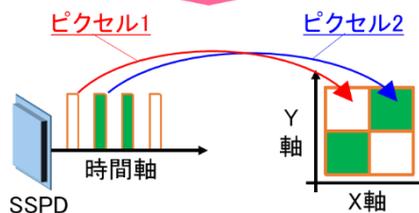
### 2. 研究の目的

本研究の学術的目的は、単一光子の位置検出を実現することである。そのために本研究では、光子の位置情報を時間情報に変換・多重化する技術を開発し、SSPD と組み合わせることで、シングルピクセルの単一光子検出器を用いて光子の位置検出が可能な時分割多重単一光子イメージングシステムを開発することを目的としている。

図1に提案する時分割多重単一光子イメージングの概念を示す。測定平面上に入射する光子に対して、入射位置ごとに異なる時間遅延を付与したうえで同一光路上に結合する。光子は入射位置に応じて、時間軸上に配列されることになり、位置情報が時間情報へ変換・多重化される。次に、シングルピクセルの単一光子検出器を用いて、時間軸上に配列した光子を順次検出することで、光子の検出時間情報から入射位置情報を再構成する。この手法では実現可能なピクセル数は単一光子検出器の時間分解能に依存するが、本研究では数十ピコ秒という高い時間分解能を持つ SSPD を用いることでピクセル数の向上が可能となる。



① 位置情報を時間情報に変換。



② 光子の検出時間から位置情報を再構築。

図1. 時分割多重単一光子イメージングの概念。

### 3. 研究の方法

本研究では、まず光子の位置情報を時間情報に変換・多重化するための位置情報時分割多重化光学系の開発を行う。図2に位置情報時分割多重化光学系の概略を示す。本光学系は2つのモジュールで構成される。まずコリメータマイクロレンズアレイと光ファイバアレイで構成されるマルチポジション光ファイバ結合モジュールによって、光子は入射位置座標に対応した光ファイバチャンネルに結合される。そして、長さの異なる多数の光ファイバから成る時間遅延ラインと多チャンネル光ファイバ合波器で構成される時分割多重化モジュールによって、光子は光ファイバチャンネルごとに異なる時間遅延を付与されたうえで1本の光ファイバ上に合波される。これにより光子は入射位置座標に応じて時間軸上に配列され、位置情報の時間情報への変換・多重化が行われる。次に本研究では、開発した位置情報時分割多重化光学系を SSPD と接続することにより、時分割多重単一光子イメージングシステムの開発を行う。またさらに、マルチポジション光ファイバ結合モジュールに替えてアレイ導波路回折格子 (Arrayed waveguide grating; AWG) 分光モジュールを接続することで、時分割多重単一光子分光検出システムの開発も行う。

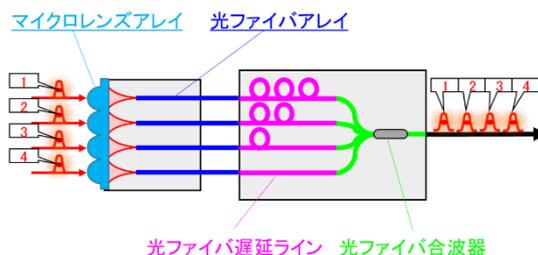


図2. 位置情報時分割多重化光学系の概略。

#### 4. 研究成果

##### (1) 時分割多重化モジュールの開発

本研究では、波長 1.5  $\mu\text{m}$  帯用の 64 チャンネル時分割多重化モジュールを開発した。図 3 は開発した時分割多重化モジュールの写真である。入力側は全長が 6 cm ずつ異なる 64 本のシングルモード光ファイバで構成されており、これはチャンネル間に約 300 ps の遅延時間差があることに相当する。これらの光ファイバの出力は、平面光波回路 (Planar lightwave circuits; PLC) で構成された 64 チャンネル光ファイバ合波器に接続されており、1 本の光ファイバに結合されて出力側から取り出される。今回開発したモジュールは挿入損失が約 19 dB と大きい値になっている。これは PLC 光合波器の挿入損失が大きいことに由来するが、実際に応用を進める上で、今後改良の検討が必要な点である。



図 3. 開発した時分割多重化モジュールの写真。

##### (2) 時分割多重分光検出システムの開発

40 チャンネル AWG 分光モジュールを時分割多重化モジュールに接続して時分割多重分光検出システムの構築を行った。AWG は PLC で構成された分光器であり、入力側の光ファイバから導入した光が出力側では複数本の光ファイバに波長ごとに分割されて出力される。この波長ごとに分割された出力を時分割多重化モジュールに入力することで、光子の波長情報を時間情報に変換・多重化する。AWG の仕様は、波長帯: 1,570~1,610 nm、チャンネル帯域幅: 約 0.5 nm、チャンネル間隔: 約 0.8 nm、挿入損失: < 3 dB である。測定では、中心波長 1,550 nm、繰り返し 10 MHz のフェムト秒パルスレーザーを光源として、プログラマブル任意スペクトル光フィルタを通してスペクトル形状を整形したのちに AWG に入力した。そして時分割多重化モジュールからの出力をシングルモードファイバで冷凍機内に導入し、SSPD を用いて光子検出を行った。SSPD の特性は、検出効率: 約 60%、暗計数: < 30 Hz、ジッタ: 約 86 ps である。光学系の各コンポーネントはシングルモード光ファイバを用いて接続した。検出時間情報の取得には時間分解能 1 ps の時間相関計数器を用いた。フェムト秒パルスレーザーの同期信号を START 信号、SSPD の検出信号を STOP 信号とした時間相関測定

により光子の検出時間を測定した。

図 4 に光スペクトラムアナライザで測定した入力光の波長分布を示す。図 4(a) が任意スペクトル光フィルタを通過した後の波長分布であり、図 4(b) は AWG と時分割多重化モジュールを通過した後の波長分布である。AWG によって離散的に分光されていることが分かる。

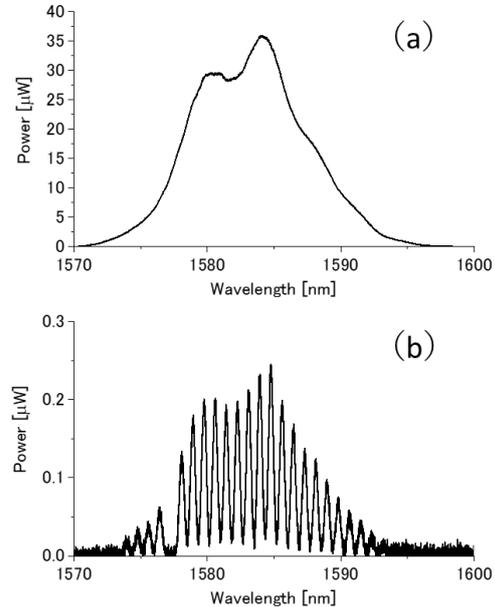


図 4. (a) AWG 入力光のスペクトル、(b) AWG 通過後のスペクトル。

図 5 に時間相関計数器で測定した光子検出の時間スペクトルを示す。AWG への入力光強度は約 0.1 photon/pulse である。全体的に図 4(b) の AWG 出力と一致するような形状のスペクトルが得られており、開発したシステムを用いて光子の検出時間から波長スペクトルを再構成可能なことが実証された。

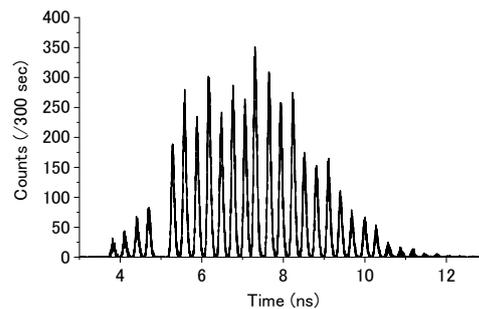


図 5. 光子検出の時間スペクトル

各波長に対応するピークを詳細にみると波長スペクトルと時間スペクトルで多少の差異があるが、これは SSPD の検出効率に光子の偏光方向依存性があることに由来する。今回のシステムでは光学系を偏波面保存でない光ファイバで構成しているため、時分割多重化の際に各時間遅延ファイバチャンネルで異なる偏光回転が生じ、各ピークで検出効率に変化する。この問題は、偏波面保存光ファイバを用いて光学系を構築することで解決できる。

### (3) 時分割多重位置検出システムの開発

48チャンネルマルチポジション光ファイバ結合モジュールを時分割多重化モジュールに接続して時分割多重位置検出システムの構築を行った。マルチポジション光ファイバ結合モジュールの入射面には48個の直径220  $\mu\text{m}$ のコリメータレンズが間隔250  $\mu\text{m}$ で一列に配列されており、各レンズに入射した光子は光ファイバアレイの対応するファイバチャンネルに結合されて出力される。この出力を時分割多重化モジュールに入力することで、光子の入射位置情報を時間情報に変換・多重化する。測定では、中心波長1,550 nm、繰り返し10 MHzのフェムト秒パルスレーザーを光源として、光ファイバを通して出射された光をコリメータレンズで光束径約3.6 mmのコリメート光としたのちにマルチポジション光ファイバ結合モジュールの入射面に照射した。そして時分割多重化モジュールを通過した出力をSSPDで検出し、時間相関計数器を用いて光子の検出時間ヒストグラムを測定した。

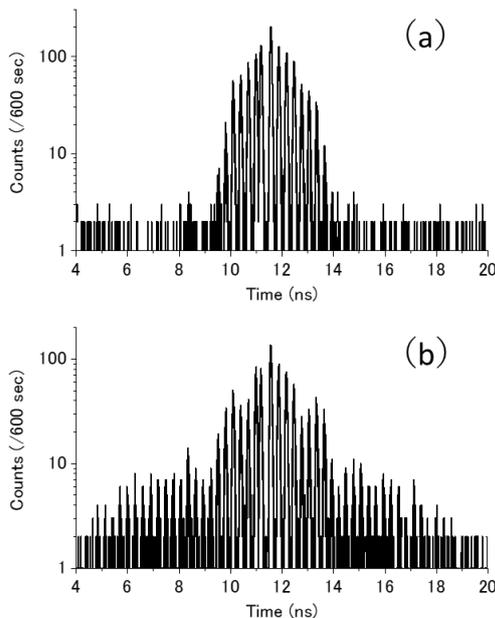


図6. 検出時間ヒストグラム。(a) コリメート光を直接照射した場合、(b)コリメータレンズの前方に細線を設置した場合。

図6に測定した検出時間ヒストグラムを示す。コリメータレンズからの出力光強度は約100 photon/pulseである。図6(a)はコリメート光をそのままマルチポジション光ファイバ結合モジュールに照射した際の検出時間ヒストグラムであり、コリメート光の光束径に対応した形状のヒストグラムが得られている。図6(b)はコリメータレンズの前方に直径約300  $\mu\text{m}$ の細線を設置した際の検出時間ヒストグラムであり、干渉の影響が見取れる。これらの結果から開発したシステムを用いて光子の検出時間から光子の検出位置を再構成可能なことが実証された。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1件)

- ① Shigehito Miki, Masahiro Yabuno, Taro Yamashita, Hirotaka Terai, Stable, high-performance operation of a fiber-coupled superconducting nanowire avalanche photon detector, OPTICS EXPRESS, 査読あり, Vol.25, 2017, No. 6, pp.6796-6804  
DOI:10.1364/OE.25.006796

[学会発表] (計 6件)

- ① Shigehito Miki, Taro Yamashita, Masahiro Yabuno, Hirotaka Terai, Performance improvement of NbTiN superconducting nanowire single photon detectors by avalanche switching architecture, 7th International Conference on Quantum Cryptography (QCrypt 2017), 2017

- ② 三木 茂人, 藪野 正裕, 山下 太郎, 寺井 弘高, 自己相関関数測定による超伝導単一光子検出素子の動作評価, 第78回応用物理学会秋季学術講演会, 2017

- ③ 三木 茂人, 藪野 正裕, 宮嶋 茂之, 山下 太郎, 山本 俊, Robert A. Kirkwood, Robert H. Hadfield, 寺井 弘高, SFQ回路を用いた超伝導ナノワイヤ単一光子検出器のタイミングジッタ特性評価, 第64回応用物理学会春季学術講演会, 2017

- ④ Shigehito Miki, Masahiro Yabuno, Taro Yamashita, Hirotaka Terai, Characterization of fiber-coupled NbTiN superconducting nanowire avalanche photon detector, International Workshop on Superconducting Sensors and Detectors (IWSSD2016), 2016

- ⑤ 三木 茂人, 藪野 正裕, 山下 太郎, 寺井 弘高, アバランシェ型超伝導ナノワイヤ単一光子検出素子における光子検出動作の系統評価, 第77回応用物理学会秋季学術講演会, 2016

- ⑥ 藪野 正裕, 山下 太郎, 三木 茂人, 清水 亮介, 寺井 弘高, SSPDを用いた時間分割多重型単一光子分光検出システムの開発, 第77回応用物理学会秋季学術講演会, 2016

[図書] (計 0件)

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 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